

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. М.В.ЛОМОНОСОВА
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

УТВЕРЖДАЮ

Директор НИИЯФ МГУ

профессор

"28"

06

И.Б.ТЕПЛОВ

1989 г.

И.А.Коржавина, В.И.Рудь

О Т Ч Е Т

по х/д № I4I-88

"Изучение свойств черенковских и сцинтилляционных
ливневых калориметров при высоких энергиях"

Часть I

Изучение свойств сцинтилляционного электро-
магнитного калориметра из кристаллов *BGO*.

Ответственный исполнитель

ст.н.с. ОВЭ  В.И.Рудь

Москва, 1989

С о д е р ж а н и е

	стр.
1. Введение	2
2. Постановка задачи	4
3. Программное обеспечение	4
4. Моделирование развития ЭМ ливней в электромагнит- ном калориметре из кристаллов ОГВ	6
4.1. Программы	6
4.2. Результаты	8
4.3. Выводы	15
5. Изучение светосбора в кристаллах ОГВ	16
5.1. Об алгоритмах и условиях светосбора	16
5.2а. Сбор на всю грань	20
5.2б. Сбор на ФЭУ без ОК	26
5.2в. Сбор на ФЭУ с ОК	31
5.2г. Поперечная неоднородность светосбора	36
5.3. Выводы	40
6. Моделирование сигнала ЭМ калориметра с учетом светосбора	41
7. Резюме	42
Литература	45
Таблицы	46

І. В в е д е н и е

Электромагнитные калориметры (ЭМК) широко используются в физике высоких энергий как детекторы электронов и γ -квантов. Одним из перспективных материалов для создания сцинтилляционных ЭМК является ортогерманат висмута $Bi_4Ge_3O_{12}$ (ОГВ или BGO). Его преимуществом является высокая плотность, малая радиационная длина X_0 и малый радиус Мольера R_M , что позволяет уменьшить объемы детекторов и улучшить их пространственное разрешение. Калориметры из ОГВ нашли применение, например, в установках *L3* [1], *CUSB* [2] и *KMD* [3].

ЭМК должен обеспечивать высокое разрешение и линейность в измерениях энергий и координат регистрируемых частиц, надежное разделение электромагнитной компоненты от адронов. Оптимизация конструкции ЭМК обычно определяется путем математического моделирования процессов, возникающих при попадании быстрых частиц в детектор, или в процессе тестовых измерений на прототипе детектора [2, 4-7]. Обычно сочетаются оба метода.

В ИТЭФ проводятся работы по исследованию прототипа ОГВ-калориметра, представляющего собой сборку из прямоугольных кристаллов сечением $2,4 \times 2,4$ см² и длиной 9,6 и 19,2 см (два варианта, см. рис. 1). В первом варианте (ЭМК-1) все кристаллы имеют длину 9,6 см ($\sim 9X_0$). Во втором варианте (ЭМК-2) центральный кристалл имеет удвоенную длину 19,2 см ($\sim 17X_0$), а окружающие его (типа 2 и 3) модули состоят из двух кристаллов длиной 9,6 см. Цифрами на рис. 1б помечены типы модулей, различаемые по своему положению в сборке:

- 1 - центральный кристалл,
- 2 - боковые модули,
- 3 - угловые модули.

Пучок электронов падает нормально к плоскости 1 в центр крис-

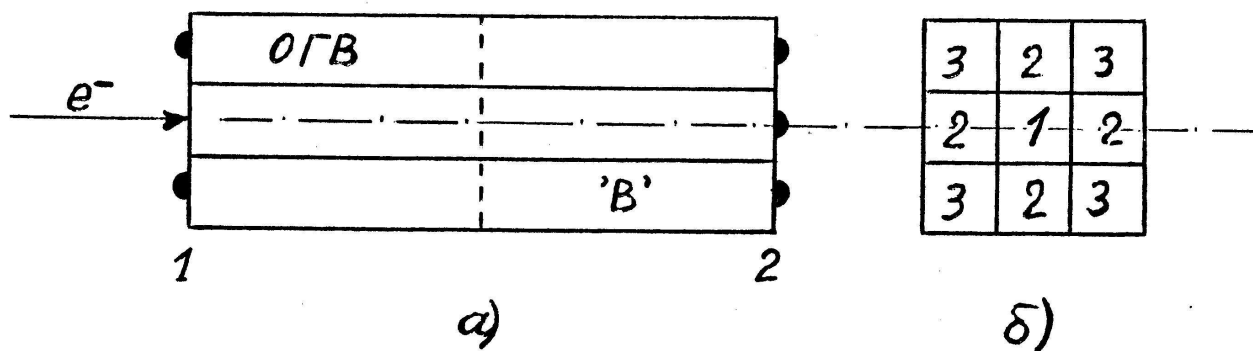


Рис. I. Схема калориметра:

- а) Вид на калориметр сбоку. Черными полукругами показаны ФЭУ. Пунктирная линия - место стыковки боковых кристаллов при двойной длине калориметра ("В" - задняя часть составного модуля).
- б) Вид на переднюю плоскость калориметра. Дана нумерация симметричных модулей.

талла I равномерно на площадку $0,5 \times 0,5 \text{ см}^2$.

В ЭМК-I ФЭУ расположены только на девяти торцах кристаллов, образующих заднюю плоскость 2. А в варианте ЭМК-2 (сборка двойной длины) ФЭУ устанавливаются и на восьми (исключая центральный) торцах образующих переднюю плоскость I.

Такие варианты калориметра исследуются на пучках электронов с энергией от 0,5 до 3 ГэВ на ускорителе ИТЭФ.

2. Постановка задачи

Нам было поручено путем моделирования изучить свойства ЭМ калориметра в виде сборки

а) 9 кристаллов ОГВ длиной 9,6 см,

б) 17 кристаллов ОГВ с общей длиной 19,2 см (см. рис. I).

Необходимо было для каждого варианта ЭМК при энергиях электронов 0,5, 1,0, 2,0 и 3,0 ГэВ получить энергосъемления в кристаллах, определить величины утечек энергии, определить энергетическое разрешение калориметра в зависимости от его структуры.

На первом этапе расчеты энергетического разрешения делаются без учета светосбора (т.е. предполагая его однородность). На втором этапе необходимо было рассчитать пространственную зависимость светосбора от геометрических и оптических параметров кристаллов. На третьем этапе нужно было получить энергетическое разрешение ЭМК с учетом светосбора при реалистических параметрах кристаллов.

3. Программное обеспечение

Для моделирования возникающего в ОГВ электромагнитного ливня нами использовалась хорошо известная в мире с 1978 г. созданная в SLAC программа *EGS* [4], прошедшая широкую апробацию в физике высоких и низких энергий, неоднократно сопоставлявшаяся с экспери-

ментальными данными. Мы использовали последнюю версию EGS^4 [5], полученную из ЦЕРНа в фортранном виде.

Программная система EGS' — это пакет широкого назначения для Монте-Карло генерации ЭМ каскада в веществе произвольной геометрии с индивидуальным прослеживанием электронов (+/-) и фотонов с энергиями от нескольких КэВ до нескольких ТэВ. В программе учитываются практически все — от фотоэффекта до рождения пар — известные ЭМ процессы в указанной области энергий. Минимально допустимые энергии: 0,01 МэВ для электронов и 0,001 МэВ для фотонов.

Использование метода Монте-Карло позволяет единым образом включать все фундаментальные процессы, работать с произвольной геометрией. При этом легко подключить дополнительные процессы. Метод Монте-Карло соответствует и внутренней случайной природе процесса развития ЭМ ливня в веществе: он дает не только средние значения величин, но и их флуктуации от ливня к ливню, что позволяет полностью имитировать процессы в экспериментальных установках.

Система EGS' универсальна, включает в себя версии для ЭВМ типа IBM, VAX и CDC. Она прекрасно документирована [4, 5].

Нам известны три программы для расчета светосбора. Это $GUIDE^7$ [6], имеющийся в библиотеке ЦЕРНа, но написанный для ЭВМ CDC; это программа $LGUIDE$ [8], написанная на версии фортрана, не подходящей для ЕС ЭВМ; это программа $LIGHT$, переделанная А.Усиком (ФИАН) из исходной программы ГАММА [9].

На первом этапе мы использовали программу $LIGHT$, ибо она сразу могла быть запущена на ЕС ЭВМ. Программа $LIGHT$ предназначена для прослеживания света в средах с простой геометрической структурой (набор прямоугольных параллелепипедов), учитывает френелевские процессы на границе двух сред, поглощение света, позволяет задавать различные условия на боковых поверхностях кристаллов. К недостаткам $LIGHT$ следует отнести отсутствие спектральной зависимости оптиче-

ских свойств среды, ограниченные возможности задания геометрии, "нерасщепляемость" фотона (т.е. невозможность моделировать диффузно отражающую обертку и т.д.).

Тем не менее большую часть расчетов удалось выполнить программой *LIGHT*, внося в нее некоторые изменения.

Часть расчетов была выполнена программой *LGUIDE* после адаптации ее к ЕС-фортрану. Алгоритм программы *LGUIDE* позволяет, например, проследивать фотоны, "расщепившиеся" в результате френелевского преломления и отражения на границе двух сред с последующим диффузным рассеянием преломленного луча.

Все вычислительные работы проводились нами на ЭВМ ЕС-1060 (ИТЭФ) и ЕС-1066 (НИИЯФ МГУ) в среде СВМ. Первоначально программное обеспечение было развернуто на ЕС-1060 в ИТЭФ, а затем перенесено в НИИЯФ.

4. Моделирование развития ЭМ ливней в электромагнитном калориметре из кристаллов ОГВ

4.1. Программы

Перед началом работы мы имели черновик РМ-файл системы *EGS'*, содержащий тексты программ на фортране-77, файлы данных, тесты, примеры и короткие рекомендации.

Собственно программа *EGS'* предполагает на входе набор данных, подготовленный препроцессором *PEG-S'*.

Препроцессор *PEG-S'* для заданных сред готовит наборы данных по всем ЭМ сечениям и относительным вероятностям процессов. При этом он производит кусочно-непрерывный линейный фит экспериментальных данных по сечениям и брэнчингам на большом числе энергетических интервалов в пределах заданного диапазона энергий.

Так как *PEG-S'* не предусматривает пользовательских подпрограмм, а работает под управлением входных данных, то после трансляции

он был записан на диск не в виде библиотеки, а в виде загрузочного модуля (типа *MODULE*). Были переписаны из *RAM*-файла на диске два входных файла для *PEG_S'* :

PG_{S4} PHPR — данные по сечениям фотоэффекта, образования пар, рэлеевскому рассеянию и т.д.,

PG_{S4}FORM — данные по атомным форм-факторам рэлеевского рассеяния.

Для простого вызова *PEG_S'* (и *EG_S'*) в различных режимах был написан ряд *EXEC*-процедур.

Так как в *PEG_S'* заложены свойства всех химических элементов, то состав сложных сред задается у него на входе указанием плотности среды, перечислением символов химических элементов и их относительных весов. Все сечения ЭМ процессов на выходе *PEG_S'* выдаются для заданного интервала энергий. Для ОГВ были заданы $E_{max} = 5$ ГэВ, $E_{min}^e = m_e + 1,5$ МэВ и $E_{min}^{\gamma} = 0,1$ МэВ.

Так как свойства среды в заданном энергетическом диапазоне постоянны, то *PEG_S'* просчитывается один раз, на что уходит ~ 10 мин СР на ЕС-1060 для описанных условий.

Программа *EG_S'* предполагает написание пользователем трех подпрограмм:

1. геометрической программы *HOW_SEAR*,
2. программы накопления результатов *AUS_SGAB* и
3. головной программы (*MAIN*'), организующей все вычисления.

В *MAIN*' сначала вызывается подпрограмма *HATCH*, вводящая массив данных после *PEG_S'* и распределяющая его в памяти, а затем в цикле организуется обращение к подпрограмме *SHOW_SER*, организующей генерацию одного ливня. Образцы *MAIN*', *HOW_SEAR* и *AUS_SGAB* даны в *RAM*-файле и описаны в руководствах [4, 5].

Ядро программы *EG_S'* после трансляции было записано на диск в виде файла *TEXT*.

Для графического представления данных и фитирования использовался пакет HBOOK.

Поскольку счет по EG $\bar{S}$ 1000 ливней при энергии 2 ГэВ, например, требует ~ 5 часов CP EC-1060, то потребовалась организация счета, обеспечивающая сохранность результатов в случае машинного сбоя или операторского прерывания. В программу была введена периодическая запись промежуточных результатов (вкл. текущее случайное число) на дисковый файл. Системно BATCH-режим в CBM организован так, что недосчитанные задачи после перезагрузки системы запускаются на счет снова пока не истечет их лимит времени или они сами не выйдут на СТОП. Поэтому, задав максимальное число событий и поставив задачу в BATCH, мы гарантированно обеспечиваем ее автоматический досчет до конца.

Подобная организация счета позволяла одновременно запускать в одном BATCH-классе несколько вариантов заданий (например, с разными начальными энергиями), которые последовательно считались в автоматическом режиме.

4.2. Результаты

При расчетах мы использовали известные свойства ОГВ (BGO) — см. табл. I.

Система координат была выбрана так: ось Z направлена по пучку электронов (рис. I) и совпадает с осью симметрии центрального кристалла; при этом центр системы координат помещался в плоскости I.

Свойства детектора определяются механизмами возникновения и формирования сигнала и механизмами его регистрации (отклик прибора).

Электрон при попадании в детектор теряет свою энергию на взаимодействия с его веществом. В результате этих взаимодействий в калориметре развивается каскад вторичных электронов, позитронов и фотонов, продольные и поперечные размеры которого внутри материала за-

висят от энергии первичного электрона. Если калориметр имеет ограниченные размеры (менее размеров ливня), то ливень частично может выйти за его пределы, и часть энергии будет утеряна: назад - за счет отражения пучка от принимающей плоскости калориметра, вперед - за счет выхода ливня за пределы ЭМК, в стороны (боковые) - за счет выхода ливня через боковые поверхности ЭМК.

Заряженные частицы ливня, взаимодействуя с атомами вещества, могут перевести их в возбужденное состояние. Излучаемые атомом при возвращении в основное состояние фотоны сцинтилляции, распространяясь в кристалле за счет отражений на границах и попадая на собирающую грань, могут быть зарегистрированы ФЭУ (сигнал).

При расчетах по EGS были установлены пороги $E_{min}^e = m_e + 1,5 \text{ МэВ}$, $E_{min}^\gamma = 0,05 \text{ МэВ}$. Ниже этих порогов частицы не трассируются, а их энергии выделяются в точке.

Основные свойства ЭМ ливней хорошо известны [10]. Они имеют ограниченный поперечный размер, именно, 95% частиц сосредоточены в цилиндре радиуса $R(95\%) = 2R_M$, где радиус Мольера $R_M = 2,4 \text{ см}$ для ОГВ. Радиальная форма ливня в разных веществах масштабируется по переменной R/R_M , где R - расстояние от оси ливня [10]. Таким образом, в ОГВ $R(95\%) = 4,8 \text{ см}$, а полусторона ЭМК у нас 3,6 см, т.е. следует ожидать заметные боковые утечки.

Продольный профиль ливня имеет форму

$$\frac{dE}{dt} = E_0 A t^\alpha e^{-\beta t}, \quad (I)$$

где $t = Z/\chi_0$, $\beta \simeq 0,5$, $\alpha \sim \beta \cdot t_{max}$, а положение максимума ливня t_{max} растет с энергией:

$$t_{max} = 1.01 \left(\ln \frac{E_0}{\epsilon_c} - 1 \right)$$

где ϵ_c - критическая энергия, χ_0 - радиационная длина.

Примерно 98% ливня укладывается в длине $3 t_{max}$:

$$L(98\%) \approx 3 t_{med},$$

$$t_{med} = t_{max} + 1,4.$$

Беря значения χ_0 и ε_c для ОГВ из табл. I, получим, что

E_0 , ГэВ	$L(98\%)$, см
0,5	14,7
2,0	19,4
3,0	20,8

Очевидно, что ЭМК-1 с длиной $L = 9,6$ см будет иметь при всех E_0 значительные утечки вперед, а в ЭМК-2 ливень почти полностью укладывается по длине вплоть до $E_0 \sim 3$ ГэВ.

Результаты расчетов по EGS^* для интервала энергий электронов $E_0 = 0,5 \div 3,0$ ГэВ приведены в таблицах 2-5 и на рисунках 2, 3 и 4.

Как и ожидалось, доля поглощенной калориметром-1 энергии E_{abs}/E_0 составляет всего 82% при $E_0 = 0,5$ ГэВ и падает с ростом энергии - в основном за счет роста утечек вперед (рис. 4).

Для ЭМК-2 доля поглощенной энергии составляет $\sim 92\%$ и почти не меняется с энергией, что соответствует линейному отклику калориметра.

Поперечные (боковые) утечки составляют $\sim (2-4)\%$ у ЭМК-1 и 6% - у ЭМК-2.

Утечки назад пренебрежимы в обоих случаях.

Расчеты показывают (рис. 3), что в случае ЭМК-2 возможна регистрация и одним центральным кристаллом (MI), обеспечивающим линейность отклика.

Разрешение калориметра определяется утечками и статистическими флуктуациями ливня, которые зависят от энергии регистрируемых частиц и размеров детектора. Расчеты без учета процессов

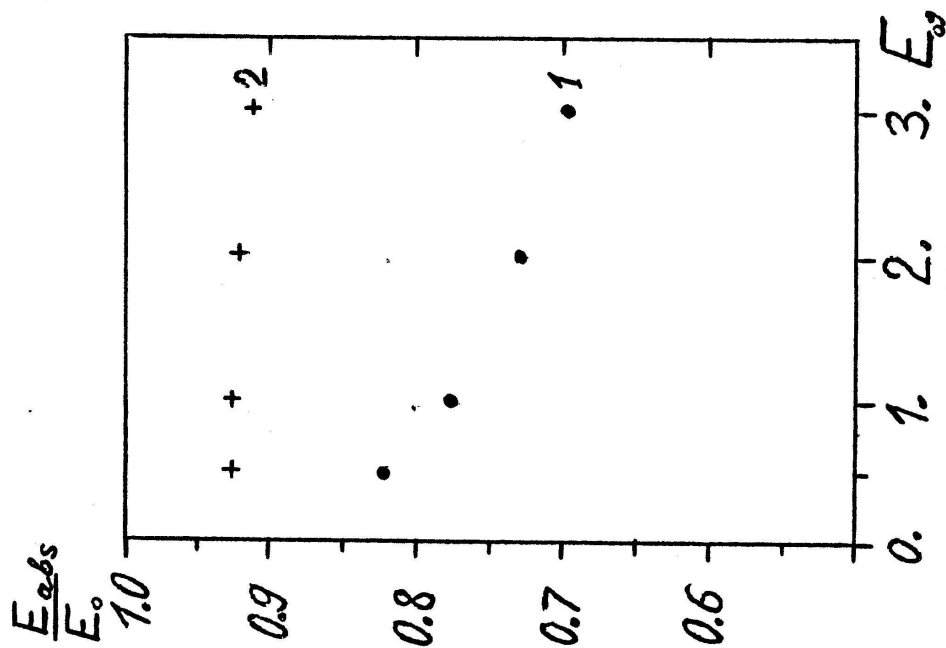


Рис. 2.

Доля поглощенной калориметром энергии:
 • (1) - ЭМК-1,
 + (2) - ЭМК-2.

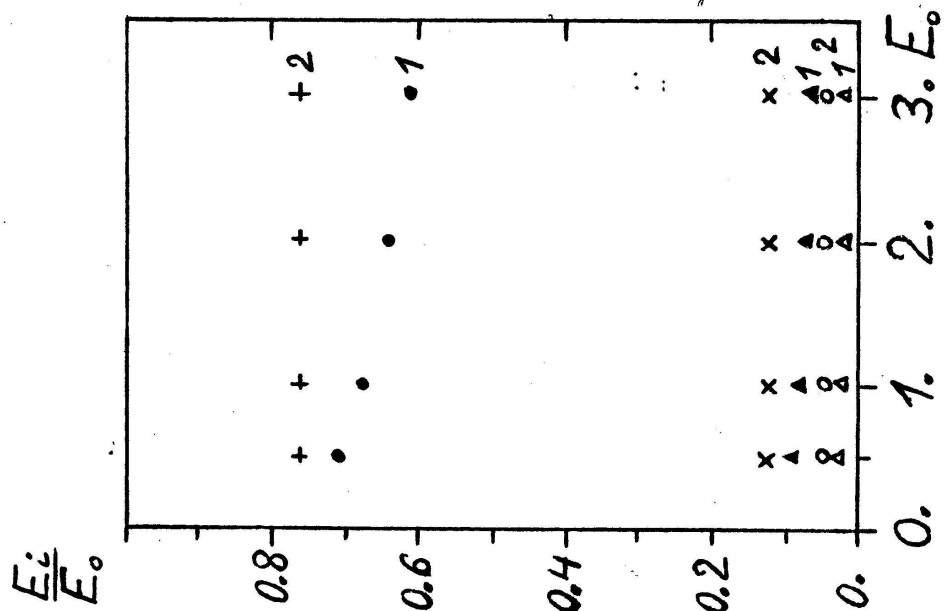


Рис. 3.

Доля энергии, поглощенной модулями $m1(\bullet, +)$, $m2(\Delta, x)$ и $m3(\Delta, o)$:
 1 - ЭМК-1, 2 - ЭМК-2.

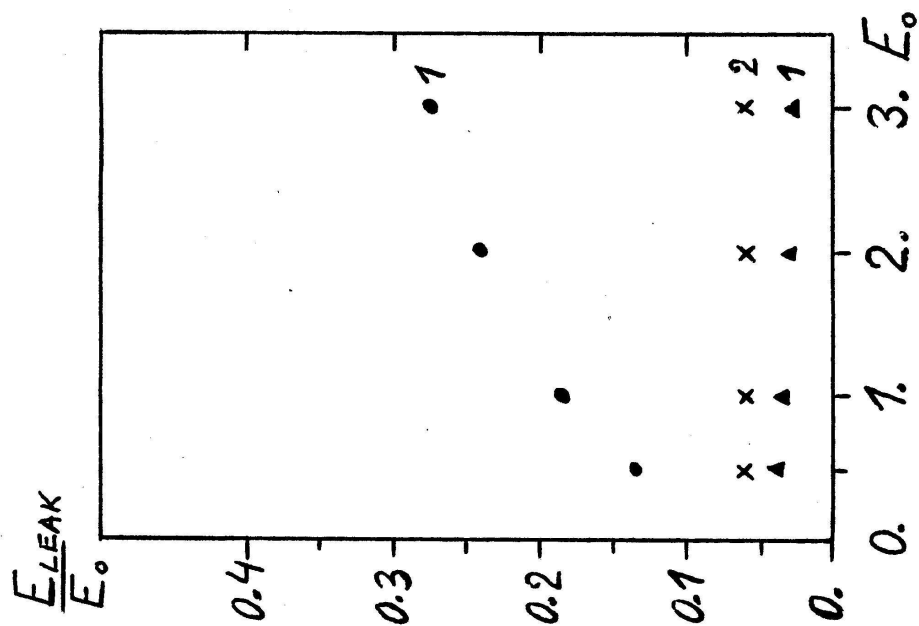


Рис. 4.

Относительные утечки:
 • - вперед (ЭМК-1),
 Δ - поперек (ЭМК-1),
 x - поперек (ЭМК-2).

светосбора и эффективности регистрации сигнала определяют нижнюю границу разрешения калориметра.

Распределения по доле энергии, выделившейся в калориметре и центральном кристалле (МІ), имеют негауссову форму (рис. 5) с длинным "хвостом" в мягкой части и крутым фронтом правее максимума.

Для определения энергетического разрешения эти распределения описывались несимметричным выражением

$$N(E) = A \exp\left[-\frac{(E-E_m)^2}{2\sigma_i^2}\right], \quad (2)$$

где

$$\sigma_i = \begin{cases} \sigma_1 & \text{для } E < E_m, \\ \sigma_2 & \text{для } E > E_m, \end{cases}$$

E_m - положение максимума спектра. В этом случае $FWHM = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$. Для соотнесения с "гауссовой" формой мы определяли разрешение как

$$\frac{\sigma_E}{E_m} = \left(\frac{FWHM}{2,355}\right) \frac{1}{E_m}. \quad (3)$$

Разрешение определялось как для ЭМК-І и ЭМК-2 в целом, так и отдельно для их центральных кристаллов. Результаты приведены в табл. 6 и на рис. 6.

Разрешение ЭМК-І составляет $\sim(7-9)\%$ и ухудшается с энергией, ибо растут утечки (рис. 4).

По сравнению с ЭМК-І разрешение ЭМК-2 при $E_0 = 0,5$ ГэВ примерно вдвое лучше и улучшается с ростом энергии (растет число частиц в ливне - падают флуктуации при почти полном поглощении). Разрешение ЭМК-2 в интервале энергий $0,5 \div 3,0$ ГэВ можно представить в виде

$$\frac{\sigma_E}{E_m} \sim \frac{2,8\%}{E_0^{0,30}} \quad (4)$$

(прямая на рис. 6).

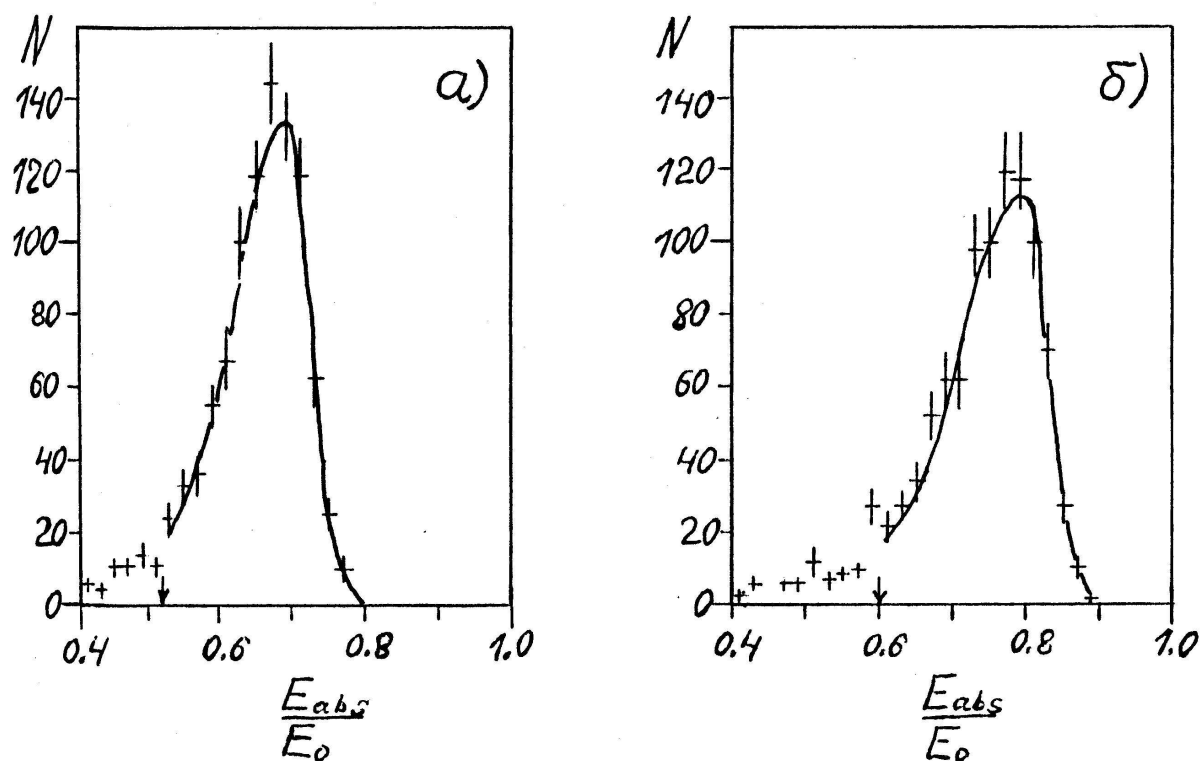


Рис.5. Профили доли поглощенной энергии при энергии пучка $E_0=2,0$ ГэВ:
 а) - во всем ЭМК-I,
 б) - в центральном кристалле ЭМК-I.
 Кривые - результата аппроксимации данных выражением (2), стрелками показаны нижние границы интервалов фитирования.

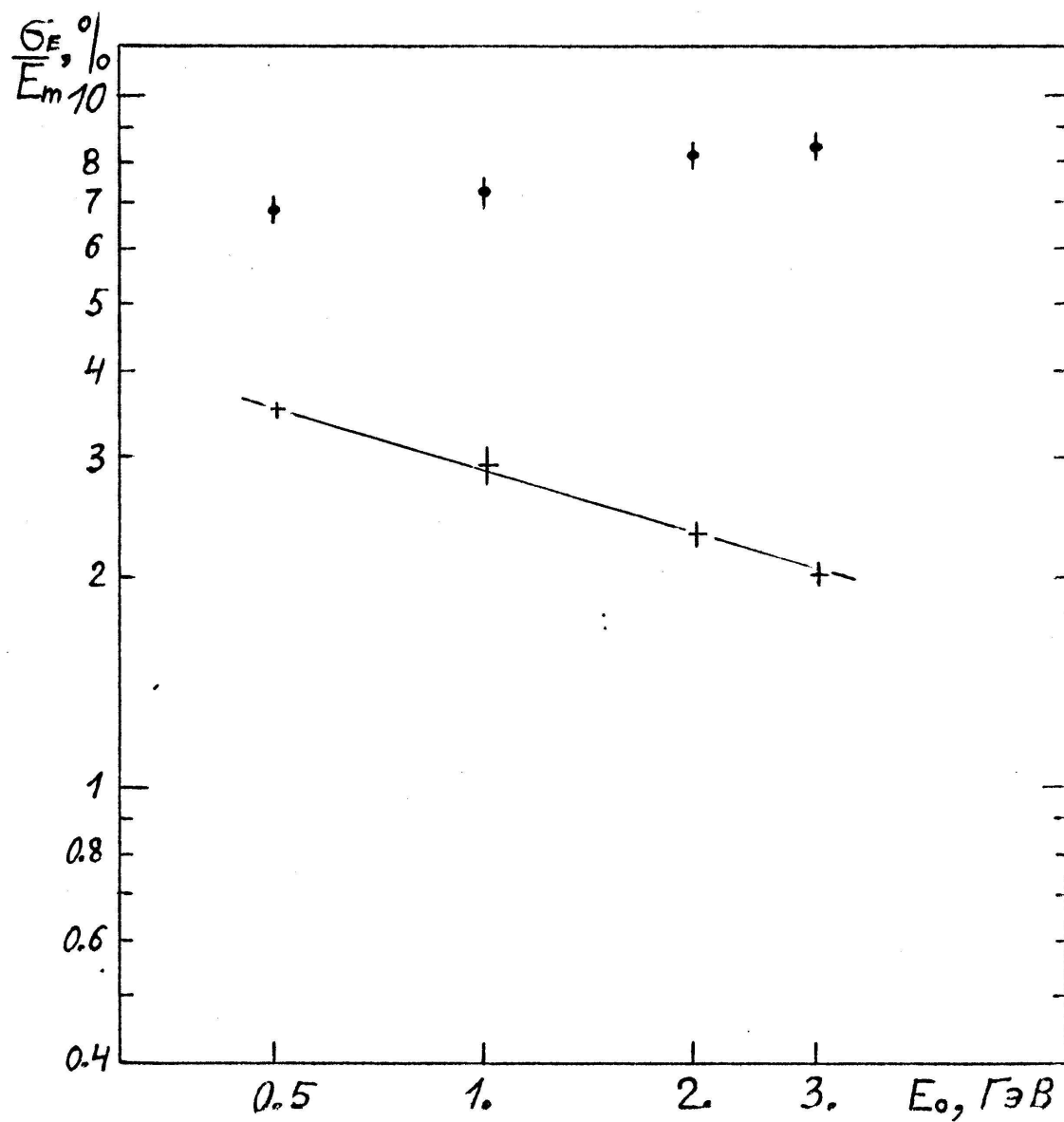


Рис.6. Энергетическое разрешение
ЭМК-I (●) и ЭМК-2 (+).

В случае ЭМК-1 центральный кристалл (М1) дает почти такое же разрешение, как и весь калориметр (при $E_0 \geq 1$ ГэВ). Видимо, это связано с тем, что основной вклад здесь в разрешение дают продольные а не боковые утечки.

Для ЭМК-2, где утечки вперед пренебрежимы, а разрешение определяется боковыми утечками, разрешение у М1 примерно вдвое хуже разрешения всего калориметра.

4.3. Выводы

Расчеты показывают, что в силу больших утечек вперед, растущих с энергией, калориметр ЭМК-1 не обладает в заданном диапазоне энергий линейным откликом, имеет невысокое для ОГВ энергетическое разрешение.

Калориметр двойной длины ЭМК-2 имеет пренебрежимые утечки вперед и постоянные - боковые утечки. В силу этого он обладает линейным откликом, имеет высокое энергетическое разрешение

$$\frac{\sigma_E}{E_m} \approx \frac{2,8\%}{E_0^{0,30}}.$$

Использование в ЭМК-2 для измерений только центрального кристалла приведет к существенному (1,5 раза) ухудшению разрешения.

Анализ пространственной структуры поглощения ливня показал, что в калориметре ЭМК-2 нельзя отказаться в задней половине от кристаллов модулей М2 или М3, ибо только передний и задний кристаллы этих модулей вместе поглощают не зависящую от E_0 долю полной энергии. Именно, доли поглощенной энергии в кристаллах М2F (М3F) падают, а в кристаллах М2В (М3В) растут с энергией.

Скорость генерации программой EGS'4 на ЕС-1060 одного ливня составила $\tau = 4,8 E_0$ (сек/ГэВ) для ЭМК-1 (или $T_{1000} = 1,33 E_0$ час/ГэВ) и $\tau = 10 E_0$ (сек/ГэВ) для ЭМК-2 (или $T_{1000} = 2,8 E_0$ час/ГэВ).

5. Изучение светосбора в кристаллах ОГВ

При создании ЭМ калориметров, где регистрируется та часть поглощенной энергии, что излучается в виде света, важную роль играет процесс светосбора. Во-первых, если коэффициент светосбора мал, будет мал и сигнал калориметра, что может создать проблемы. Во-вторых, пространственная неоднородность светосбора может приводить к искажению регистрируемой формы ливня и ухудшению энергетического разрешения ЭМ калориметра [7].

Последнее обстоятельство может оказаться важным при создании прецизионных ЭМ калориметров и заставляет принимать меры для обеспечения максимальной однородности светосбора.

5.1. Об алгоритме и об условиях светосбора

Основные результаты по светосбору были получены с помощью программы *LIGHT* [9], удобной простотой обращения.

Алгоритм расчета светосбора для сцинтилляторов состоит в следующем. В выбранной точке объема кристалла разыгрывается изотропное угловое распределение фотонов. Мы использовали для этого фиксированную равномерную решетку $d\cos\theta \times d\varphi$ с числом φ -интервалов $N_\varphi = 7 \div 15$ и с числом $\cos\theta$ -интервалов $N_\theta = 400 \div 1000$.*) Было проверено, что дальнейшее увеличение N_φ и N_θ не сказывается на результатах. N_φ мало в силу близости геометрии кристалла к цилиндру.

Каждый испущенный под углом (θ, φ) фотон (с начальной интенсивностью $I_0 = 1$) трассируется в кристалле с учетом поглощения, френкелевского преломления и отражения и зеркального отражения на внешних поверхностях, окружающих кристалл (рис. 7).

*) Угол θ отсчитывается от оси Z (рис. 7а) в обе стороны, причем ось Z совпадает с большой осью симметрии кристалла, а $\theta = 0$ соответствует направлению на ФЭУ. Угол φ отсчитывается в поперечной к Z плоскости.

Поглощение в среде учитывается законом $I_2(L) = I_1 \exp(-\mu L)$, где L - расстояние между точками 1 и 2, $I_{1,2}$ - соответствующие интенсивности, μ - коэффициент поглощения. Интенсивность также падает и за счет потери части света при отражениях (либо уходах через грани без отражателей).

Трассировка фотона прекращается, если

- его пробег превышает P_{lim} ,
- его интенсивность стала меньше E_{lim} ,
- он попал на фотокатод.

Попавшие на фотокатод фотоны (с интенсивностями I_i) и определяют светосбор τ от данной точки Z :

$$\tau(Z) = \frac{1}{N_Z} \sum I_i, \quad (5)$$

где N_Z - число фотонов, излученных в точке Z .

Светосбор τ тем выше, чем меньше фотонов неозвратно уходят из кристалла, чем меньше поглощение μ , чем меньше фотонов "захватываются" кристаллом (т.е. чем больше угол ПВО) и чем ближе площадь фотокатода к площади собирающей грани [11].

Предел $E_{lim} = 0,01$ был выбран исходя из 1% влияния на результат при требуемой точности расчета светосбора $\sim 10\%$. Выбранный $P_{lim} = 1000$ см (2000 см) для кристаллов длиной 9,6 см (19,2 см) работал только при $\mu = 0$, ибо уже при $\mu = 0,01$ см⁻¹ предел по интенсивности дает максимальный пробег $L_{max} = \mu^{-1} \ln(E_{lim}^{-1}) \approx 460$ см. Однако было проверено, что при $\mu = 0$ светосбор на всю грань для кристалла длиной 9,6 см не зависит от P_{lim} при его изменении от 1000 до 5000 см.

В каждой точке генерировалось $N_Z = 3000 \div 6000$ фотонов. $N_Z = N_\varphi \cdot N_\theta$ выбиралось так, чтобы светосбор $\tau(Z)$ в каждой точке был вычислен с точностью не хуже 10%.

В программу *LIGHT* нами был внесен ряд небольших изменений:

- исключено прослеживание фотонов, испытывающих ПВО на собирающей грани;
- вставлен счет ошибки для коэффициента светосбора Σ ;
- уточнено выражение для интенсивности света, вернувшегося в кристалл после отражения от внешней зеркальной обертки.

Моделировались схемы светосбора, изображенные на рис. 7.

Во всех случаях зазоры Δ (см. рис. 7а) считались нулевыми.

В случае а) предполагался ФЭУ с фотокатодом, перекрывающим всю собирающую грань ("сбор на всю грань"). В других случаях рассматривался ФЭУ с диаметром фотокатода 12 мм. В случае в) ФЭУ присоединяется к кристаллу с помощью оптической смазки - без воздушного зазора.

Использовались следующие показатели преломления:

ОГВ	2,15
воздух	1,0
стекло ФЭУ	1,5
смазка	1,5 .

Отражающаяся обертка считалась в большинстве случаев зеркально отражающей с коэффициентом отражения R ($R=0$ соответствует отсутствию обертки). В качестве такой обертки часто применяется алюминиевая фольга, имеющая $R = 0,90$ для длин волн 450-600 нм-см. [11], стр. 28.

Кристаллы ОГВ предполагались оптически однородными, имеющими полированную поверхность. Наряду с прозрачными кристаллами ($\mu=0$.) изучались и кристаллы с $\mu = 0,01 \text{ см}^{-1}$ и $\mu = 0,10/\text{см}$. Коэффициент зеркального отражения R варьировался от 0,7 до 0,9 .

Рассматривалась и обертка из белой бумаги с диффузным отражением с $R = 0,85$ и покрытие граней кристалла белой краской с $R = 0,9$.

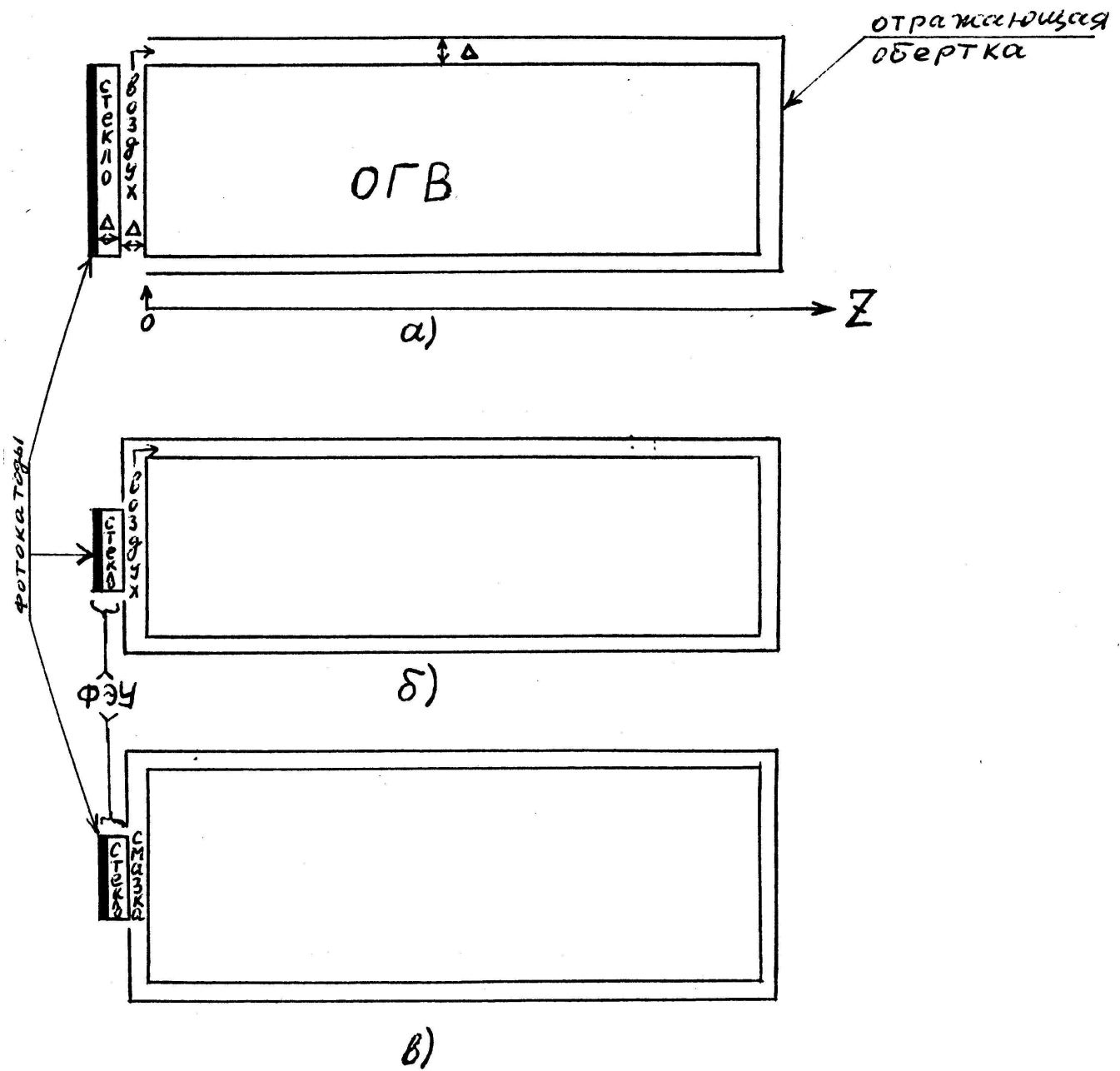


Рис.7. Схема светосбора с кристалла ОГВ.
 а) Сбор на всю грань без смазки.
 б) Сбор на ФЭУ без смазки.
 в) Сбор на ФЭУ со смазкой.

Отражение от бумаги и краски, кроме зеркальной составляющей, имеет вклад процесса диффузного рассеяния.

Проверка программы *LIGHT* заключалась, например, в том, что были воспроизведены известные результаты:

- 1) при $\mu = 0$ светосбор τ при сборе на всю грань однороден — не зависит от положения точки в кристалле (ни от продольной, ни от поперечной координаты), см. [II], стр. 134;
- 2) с 10% точностью воспроизведена зависимость $\tau(Z)$ для цилиндра с $n_0 = 1,5$ — см. [II], стр. 140.

Поскольку при сборе на всю грань светосбор не зависит от поперечной координаты, то мы рассматривали только излучение от точек оси кристалла, причем шаг между точками был выбран равным X_0 исходя из продольной структуры ливня (результаты работы [7]).

5.2а. Сбор на всю грань

В табл. 7 и 8 и на рис. 8–10 приведены результаты расчетов при сборе на всю грань (рис. 7а) для кристаллов длиной 9,6 и 19,2 см.

При $\mu = 0$ светосбор однороден (как и следовало ожидать [II]) при всех R и имеет следующие значения:

длина кристалла:	$L_1 = 9,6$ см	$L_2 = 19,2$ см	
$R = 0.$;	$\tau_1 = 0.056 \pm 0.005$	$\tau_2 = 0.053 \pm 0.005$	(6)
0.7 ;	0.094 ± 0.008	0.089 ± 0.009	
0.9 ;	0.108 ± 0.010	0.103 ± 0.010	

Видно, что светосбор в этом случае не зависит от длины кристалла.

Аналитическое выражение [II] для светосбора (в случае $\mu = 0$ и $R = 0$)

$$\tau_0 = \frac{1}{2} (1 - \cos \gamma),$$

$$\gamma = \arcsin \frac{1}{n_0} \quad (7)$$

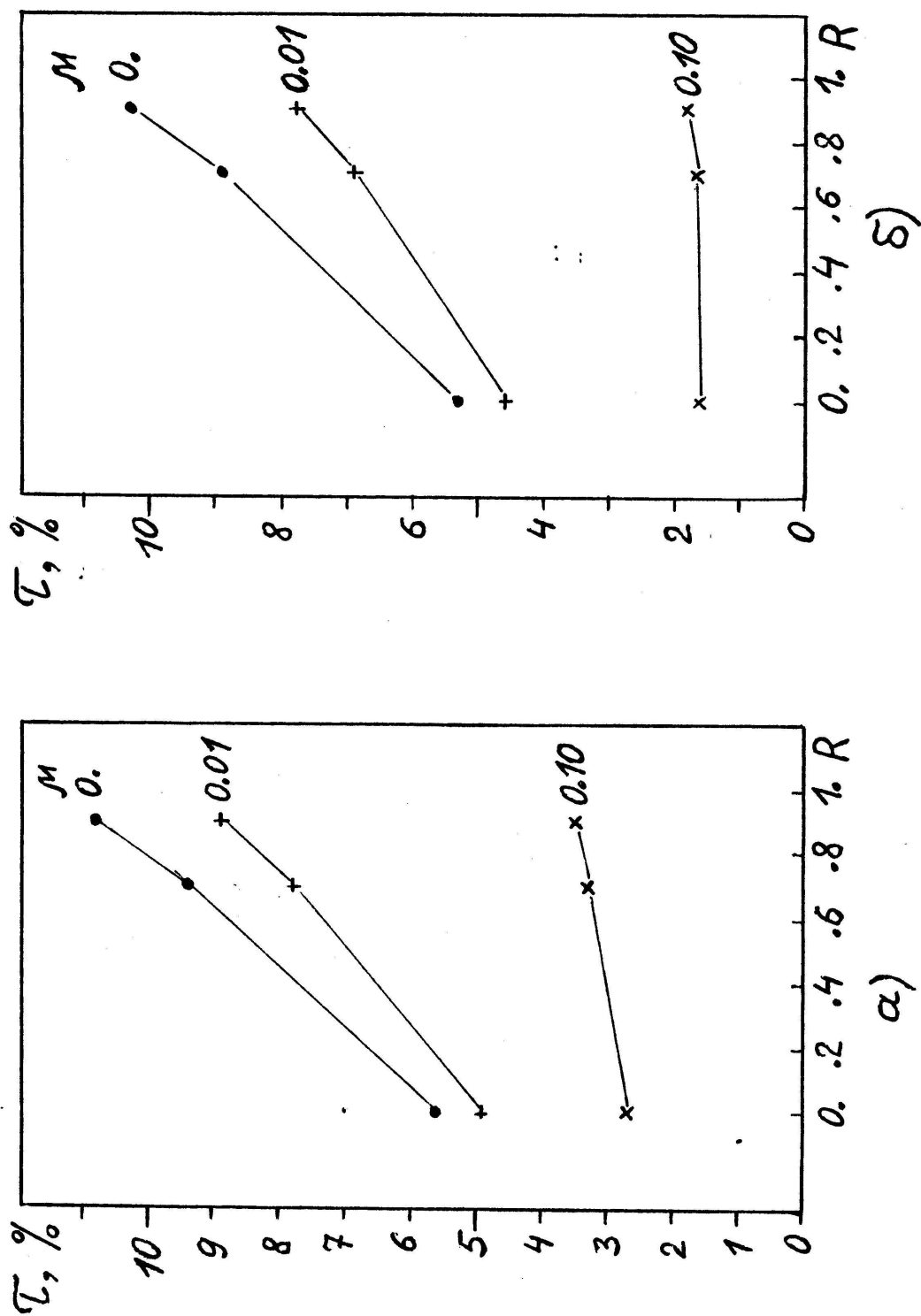


Рис. 8. Зависимость светосбора на всю грань от R и μ :

а) длина кристалла 9.6 см,

б) длина кристалла 19.2 см.

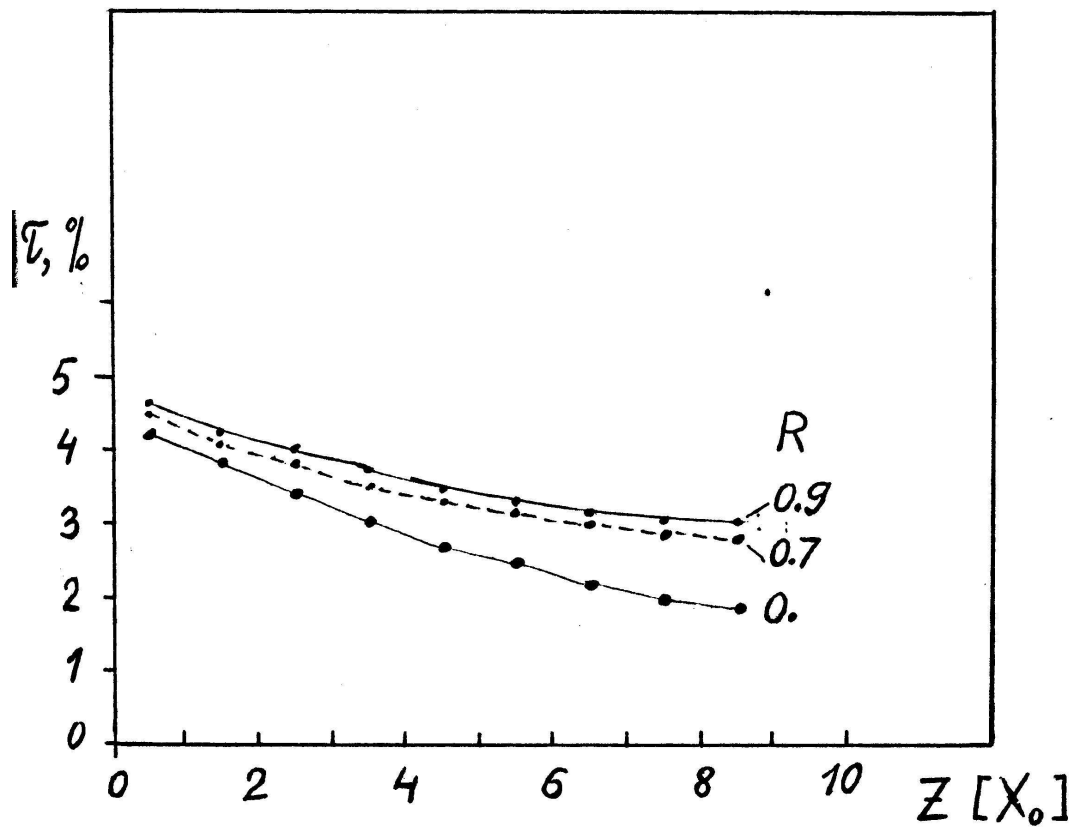


Рис 9. Зависимость светосбора T от расстояния Z (в X_0) до собирающей грани. Сбор на всю грань, $\mu = 0.10$, $L = 9.6$ см.

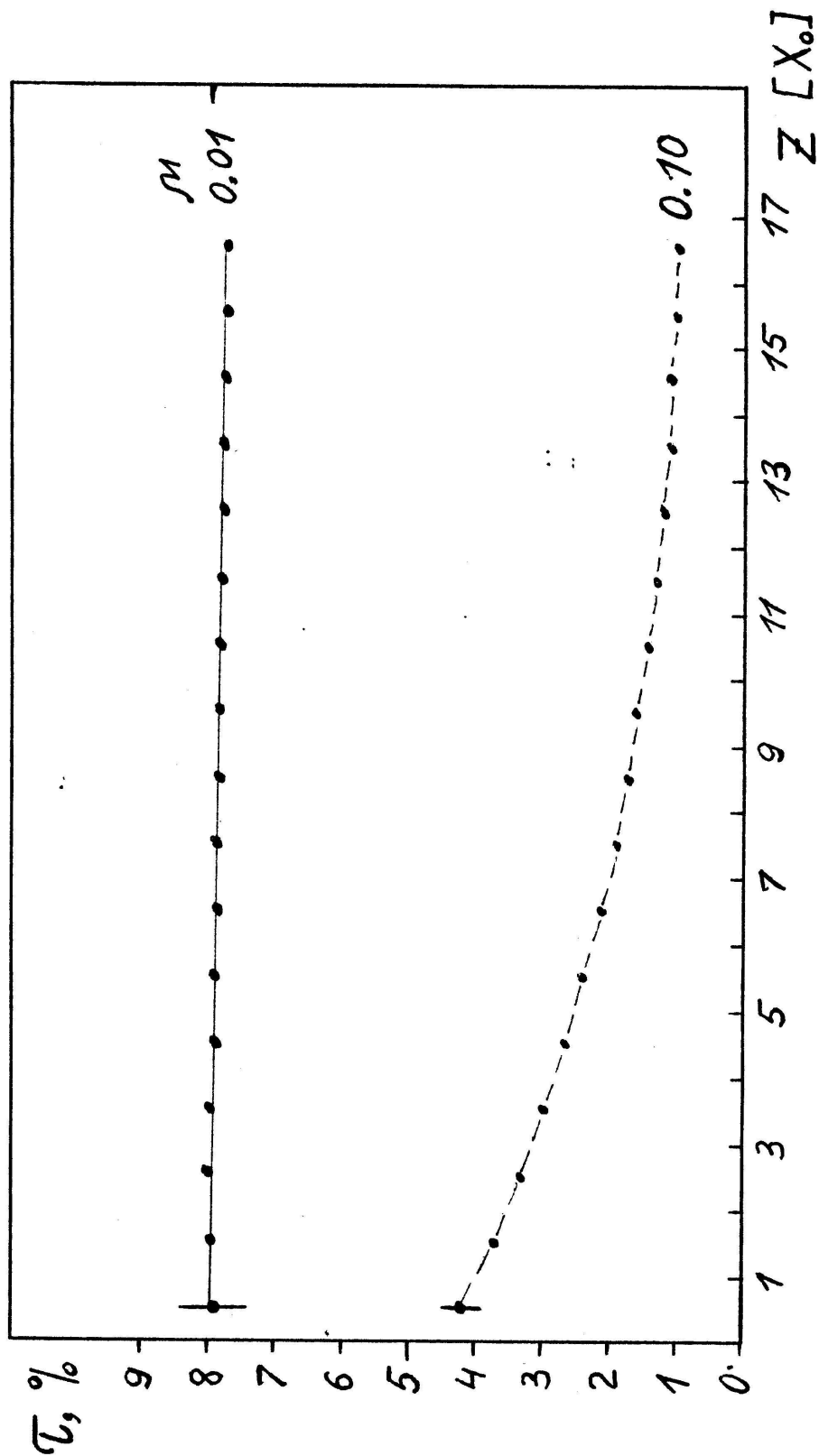


Рис. 10. Зависимость светосбора τ от расстояния Z до собирающей грани для кристалла с $L=19.2$ см. Сбор на всю грань, $R=0.9$.

при $n_0 = 2,15$ ^{дает} значение $\tau_0 = 0,057$ независимо от длины, что хорошо согласуется с (6). Это — одна из проверок программы.

При $\mu = 0$ введение отражающей обертки примерно вдвое увеличивает светосбор. С ростом поглощения этот эффект ослабевает, но и при реалистическом $\mu = 0.01/\text{см}$ увеличение светосбора составляет $\sim 1,5 \div 1,8$ (рис. 8).

В таблицах приведена и неоднородность светосбора

$$\Delta \tau = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{0.5(\tau_{\max} + \tau_{\min})} . \quad (8)$$

При $\mu = 0.01/\text{см}$ поглощение приводит к слабой неоднородности светосбора: $\Delta \tau_1 \approx 2\%$, $\Delta \tau_2 \approx 6\%$.

Сильное поглощение ($\mu = 0.1/\text{см}$) приводит к монотонному убыванию светосбора при удалении от собирающей грани (рис. 9 и 10), давая при $R = 0,9$ неоднородности $\Delta \tau_1 = 41\%$ и $\Delta \tau_2 = 116\%$.

Важно отметить, что с повышением качества зеркальной обертки ($R \rightarrow 1,0$) не только растет светосбор, но и уменьшается обусловленная поглощением его неоднородность. Эта неоднородность растет с длиной кристалла (рис. 11).

Если светосбор осуществляется на всю грань, но с оптическим контактом (со смазкой), то его величина значительно возрастает:

$R = 0. ;$	$\tau = 0.234 \pm 0.007$	
$0.7 ;$	0.267 ± 0.007	(9)
$0.9 ;$	0.278 ± 0.007	

При этом светосбор остается однородным и независящим от длины.

Замечание к светосбору на всю грань без ОК. В этом случае мы имеем дело с распространением света в симметричном кристалле (рис. 7а), окруженном воздухом. Если обозначить

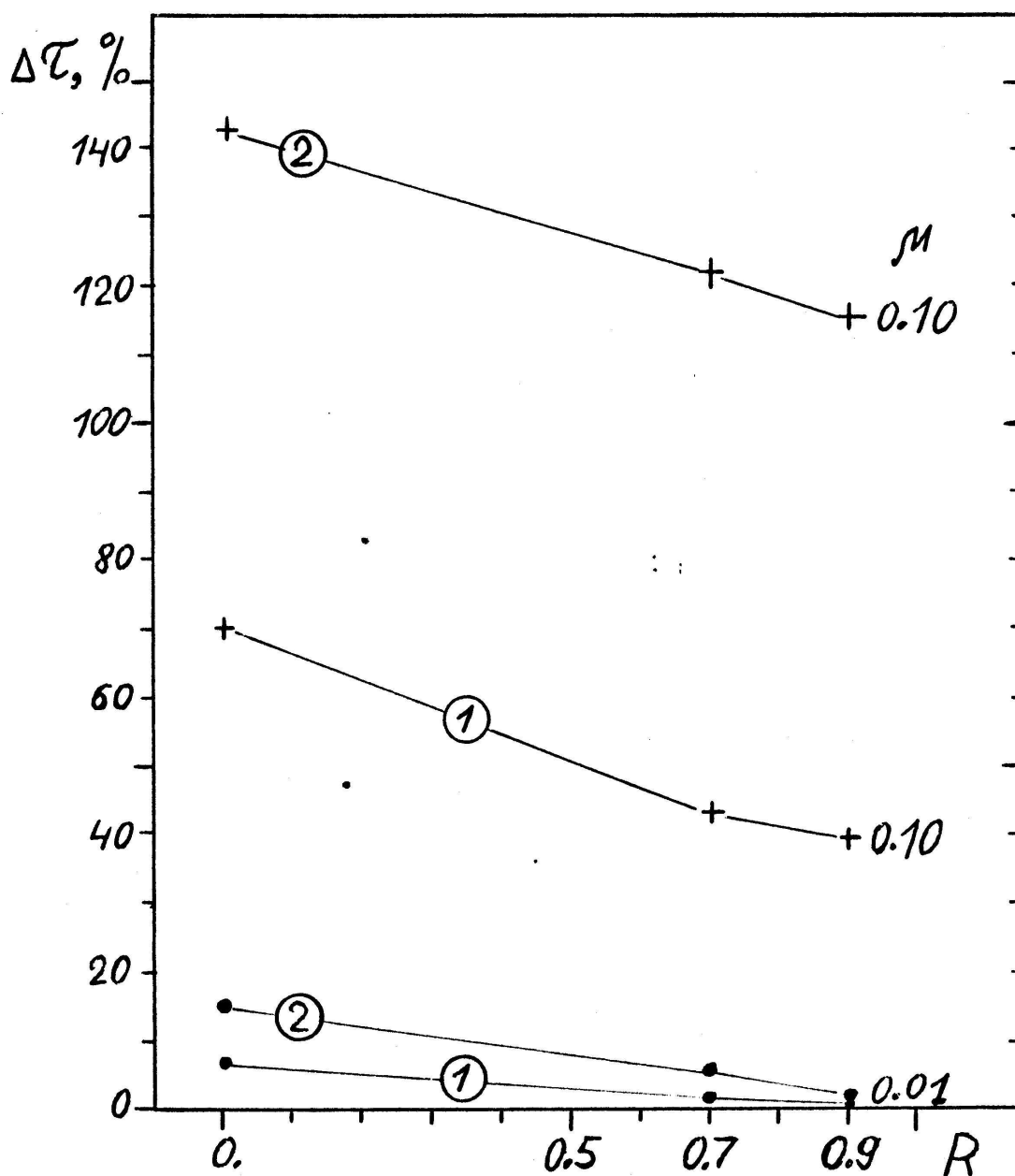


Рис. II. Зависимость неоднородности светосбора от R при $\mu = 0.01(\bullet)$ и $\mu = 0.10(+)$ для кристаллов разной длины:
 1 - $L = 9.6$ см,
 2 - $L = 19.2$ см.
 Сбор на всю грань.

$$\tilde{\theta} = \begin{cases} |\theta| & \text{при } |\theta| < \frac{\pi}{2} \\ |\pi - \theta| & \text{при } |\theta| > \frac{\pi}{2}, \end{cases}$$

то из анализа условий ПВО на торцах и боковых гранях кристалла следует, что фотоны с $\tilde{\theta} < \theta_0$ ($\theta_0 = 27,7^\circ$ - угол ПВО для ОГВ) выходят через торцы, но испытывают ПВО на боковых гранях. При этом зеркальная обертка на противоположном от ФЭУ торце позволяет вернуть в кристалл почти половину света, способного попасть на собирающую грань без ПВО. Фотоны с $\tilde{\theta} > \theta_0$ никогда не попадут на ФЭУ (из-за ПВО на собирающей грани), если есть только зеркальные отражатели. Поэтому мы и не трассируем фотоны с $\tilde{\theta} > \theta_0$. А судьба их такова: фотоны с $\theta_0 < \tilde{\theta} < \frac{\pi}{2} - \theta_0$ запираются в кристалле из-за ПВО на всех гранях, а фотоны с $\tilde{\theta} > \frac{\pi}{2} - \theta_0$ уходят через боковые грани.

5.26. Сбор на ФЭУ без оптического контакта (ОК)

Сбор на ФЭУ означает, что на собирающей грани чувствительным считается фотокатод ФЭУ с $\phi = 12$ мм, а в остальной части торца - отражающая обертка (рис. 76). Отношение площади грани к площади фотокатода в этом случае ~ 5 .

Результаты расчетов светосбора от точек на оси кристаллов представлены в табл. 9 и 10 и на рис. 12-15.

Главный результат состоит в том, что кроме общего падения светосбора примерно вдвое, резко возросла его неоднородность (даже при $\mu = 0$) - см. рис. 15. Это связано с тем, что площадь фотокатода мала по сравнению с площадью собирающей грани, а ^{лес}теньный угол, под которым виден фотокатод, убывает с удалением от него. При реалистических $\mu = 0.01/\text{см}$ и $R = 0.9$ основная неоднородность проявляется на расстоянии $Z \lesssim 3X_0$ от ФЭУ (независимо от длины кристалла). При больших расстояниях эффект "прямого попадания" на ФЭУ уступает место переотраженному свету, дающему однородный светосбор (рис. 13 и 14).

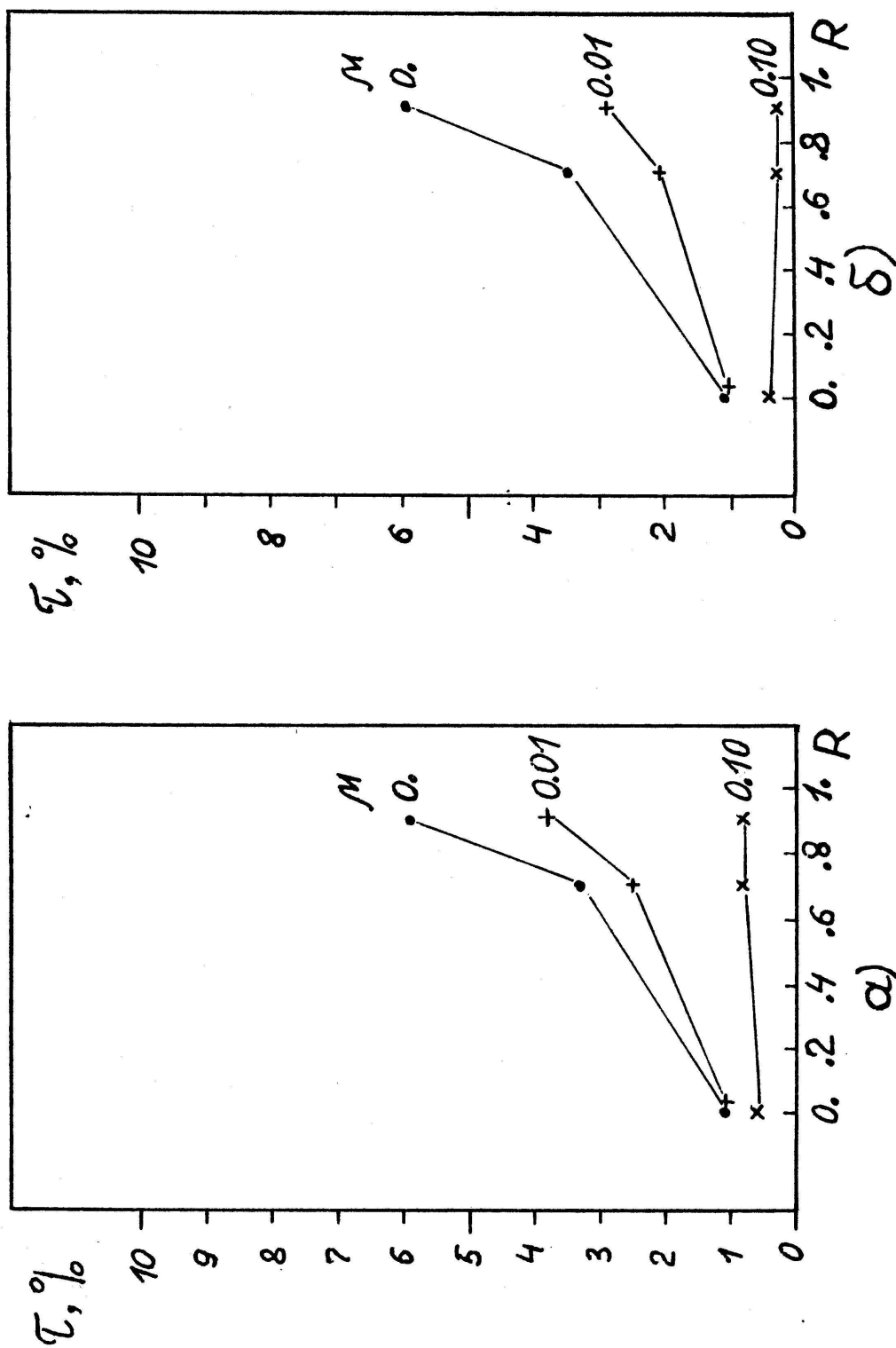


Рис. 12. Зависимость светосбора на ФЭУ без смазки

от R и μ :

а) длина кристалла $L = 9.6$ см,

б) длина кристалла $L = 19.2$ см.

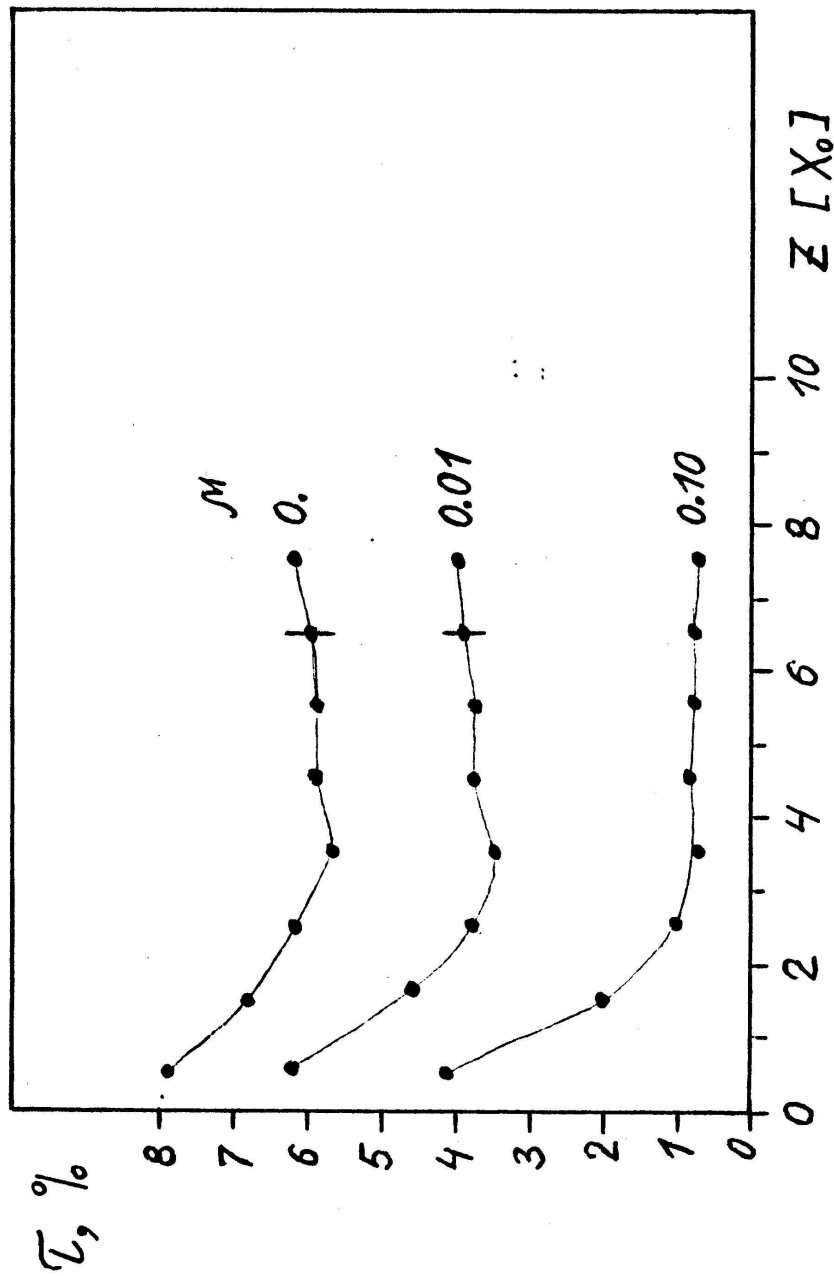


Рис. 13. Зависимость светосбора τ от расстояния z (в X_0) до ФЭУ. Сбор на ФЭУ без смазки, $R = 0.9, L = 9.6$ см.

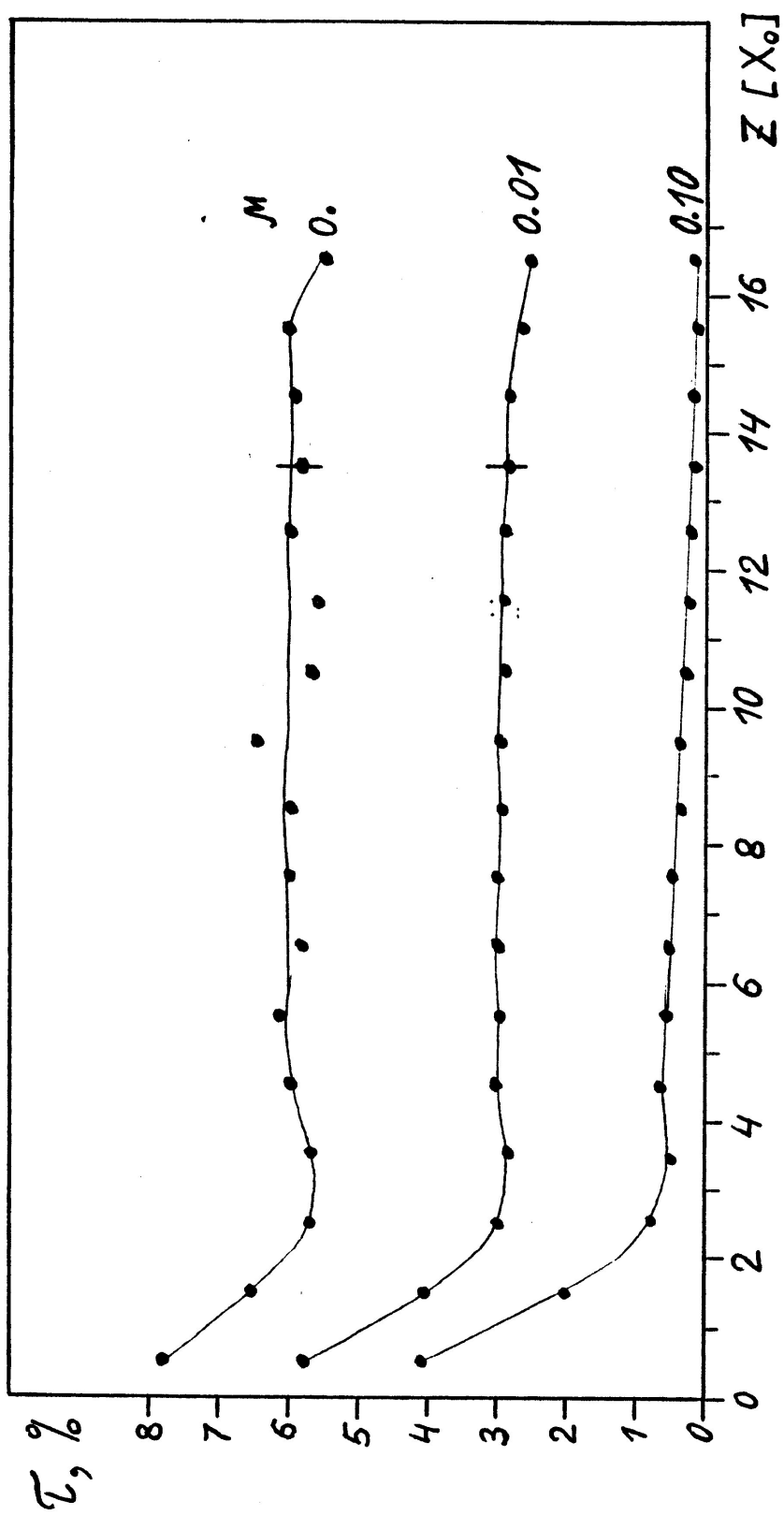


Рис. 14. Зависимость светосбора τ от расстояния Z (в X_0) до ФЭУ. Сбор на ФЭУ без смазки,
 $R = 0.9$, $L = 19.2$ см.

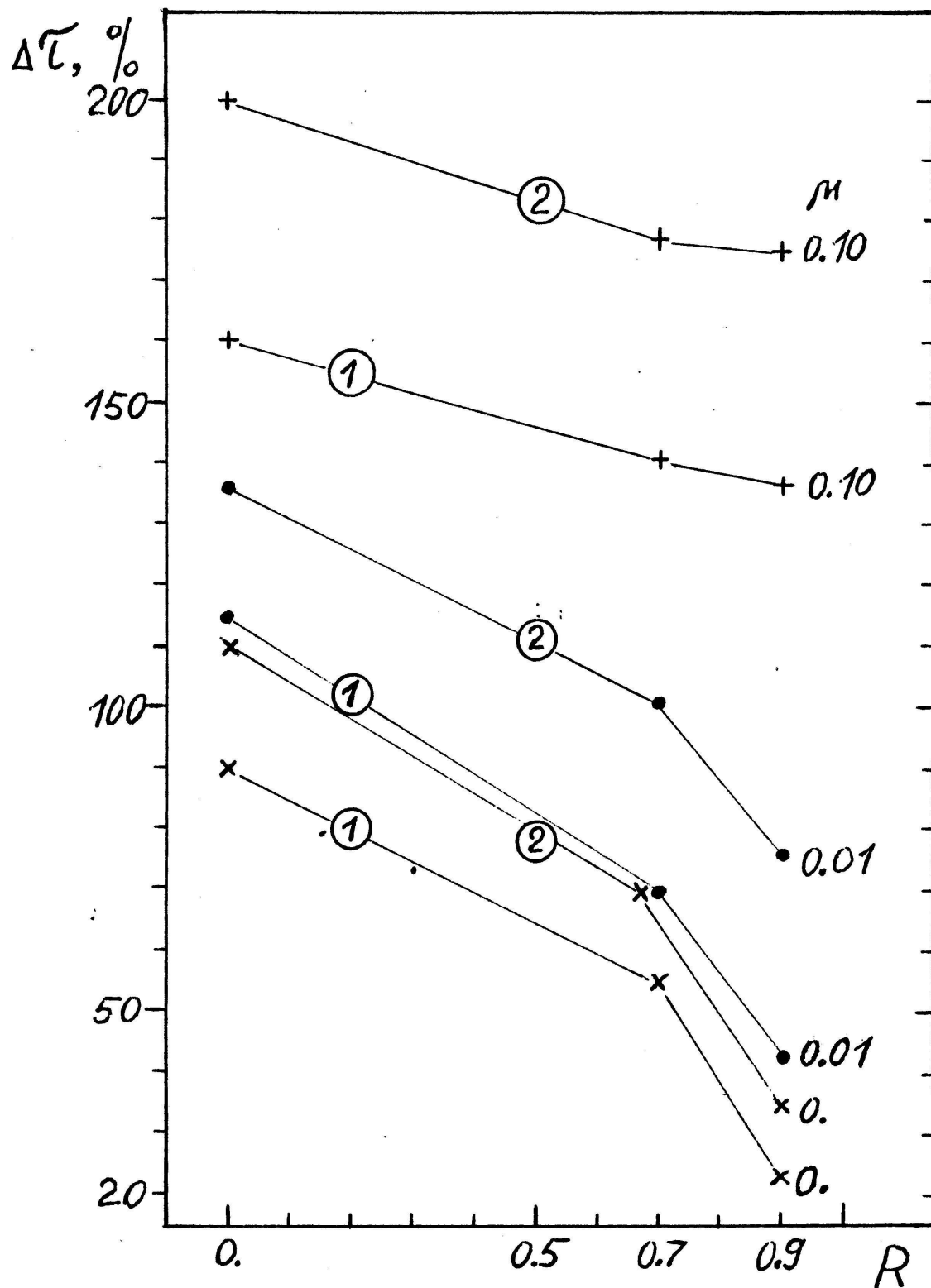


Рис. 15. Зависимость неоднородности светосбора от R при $\mu=0.10(+)$, $\mu=0.01(\bullet)$ и $\mu=0.(x)$ для кристаллов разной длины:
 1 - $L=9.6$,
 2 - $L=19.2$.
 Сбор на ФЭУ без смазки.

Указанная неоднородность светосбора резко уменьшается с введением зеркальной обертки для достаточно прозрачных кристаллов (рис. 15).

Светосбор от средней точки кристаллов упал в $\sim 2,5$ раза (табл. 15) при переходе от сбора на всю грань к сбору на ФЭУ без ОК.

5.2в. Сбор на ФЭУ с оптическим контактом

Оптический контакт означает наличие между ФЭУ и кристаллом не воздушного промежутка, а смазки с $n = 1,5$ (рис. 7в), что увеличивает угол ПВО на собирающей грани с 28° до 44° . Размер фотокатода прежний.

Результаты расчетов представлены в табл. II и I2 и на рис. 16-19.

Сравнение этих результатов с данными предыдущего раздела показывает, что примерно втрое возрос светосбор - при сохранении прежней величины его неоднородности. Увеличение светосбора связано с увеличением угла ПВО на собирающей грани, что уменьшило долю заи раемого света.

Следует отметить, что поглощение света несколько больше сказывается на длинном кристалле, уменьшая светосбор и увеличивая его неоднородность.

При поиске способов уменьшения неоднородности светосбора мы испытывали и диффузно отражающее окружение кристалла в двух вариантах:

- обертка белой бумагой с $R = 0,85$,
- покрытие всех граней, кроме собирающей белой краской с $R = 0.9$ (при этом на окрашенных гранях исчезает ПВО).

Моделирование этих условий осуществлялось программой LGUDE [8].

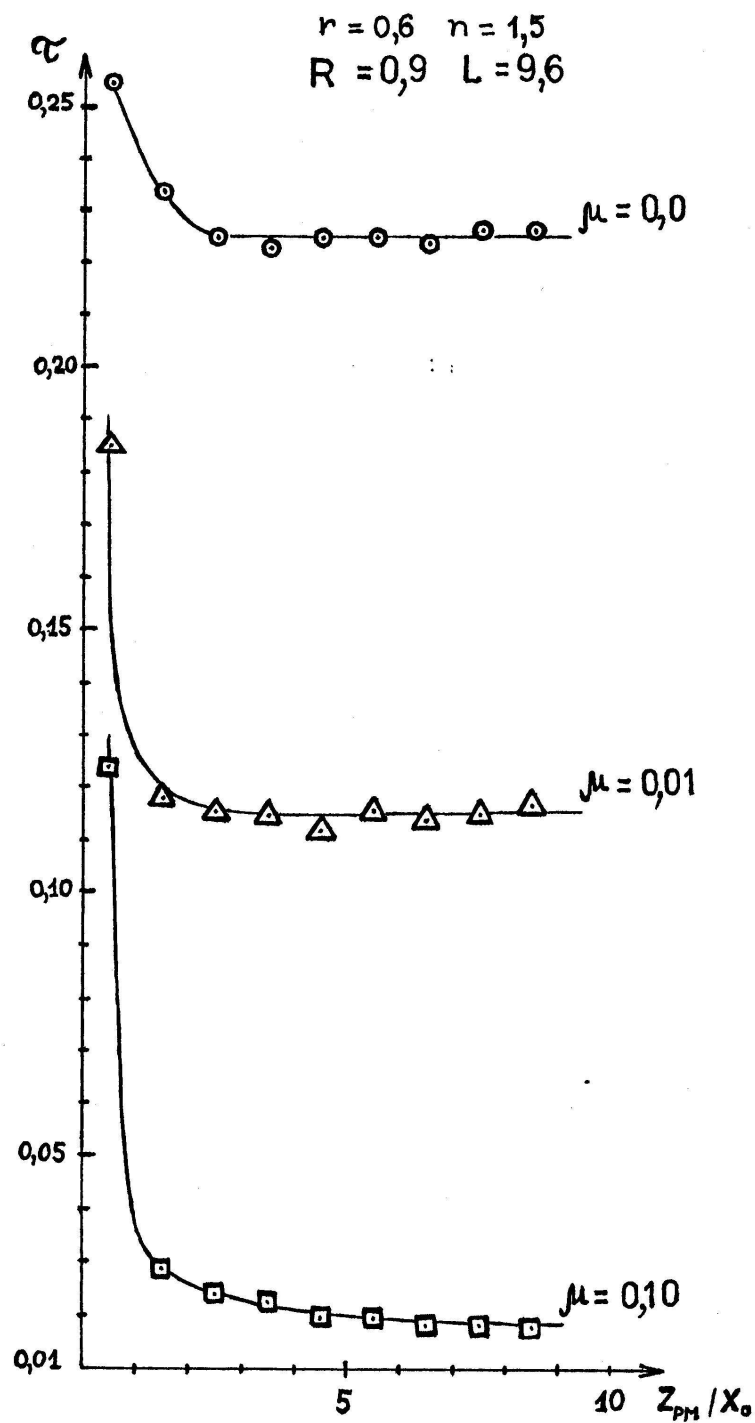


Рис. 16. Зависимость светосбора от Z — при сборе на ФЭУ с ОК и при зеркальной обертке с коэффициентом отражения $R = 0,9$ для кристалла длиной 9,6 см — при разном поглощении μ .

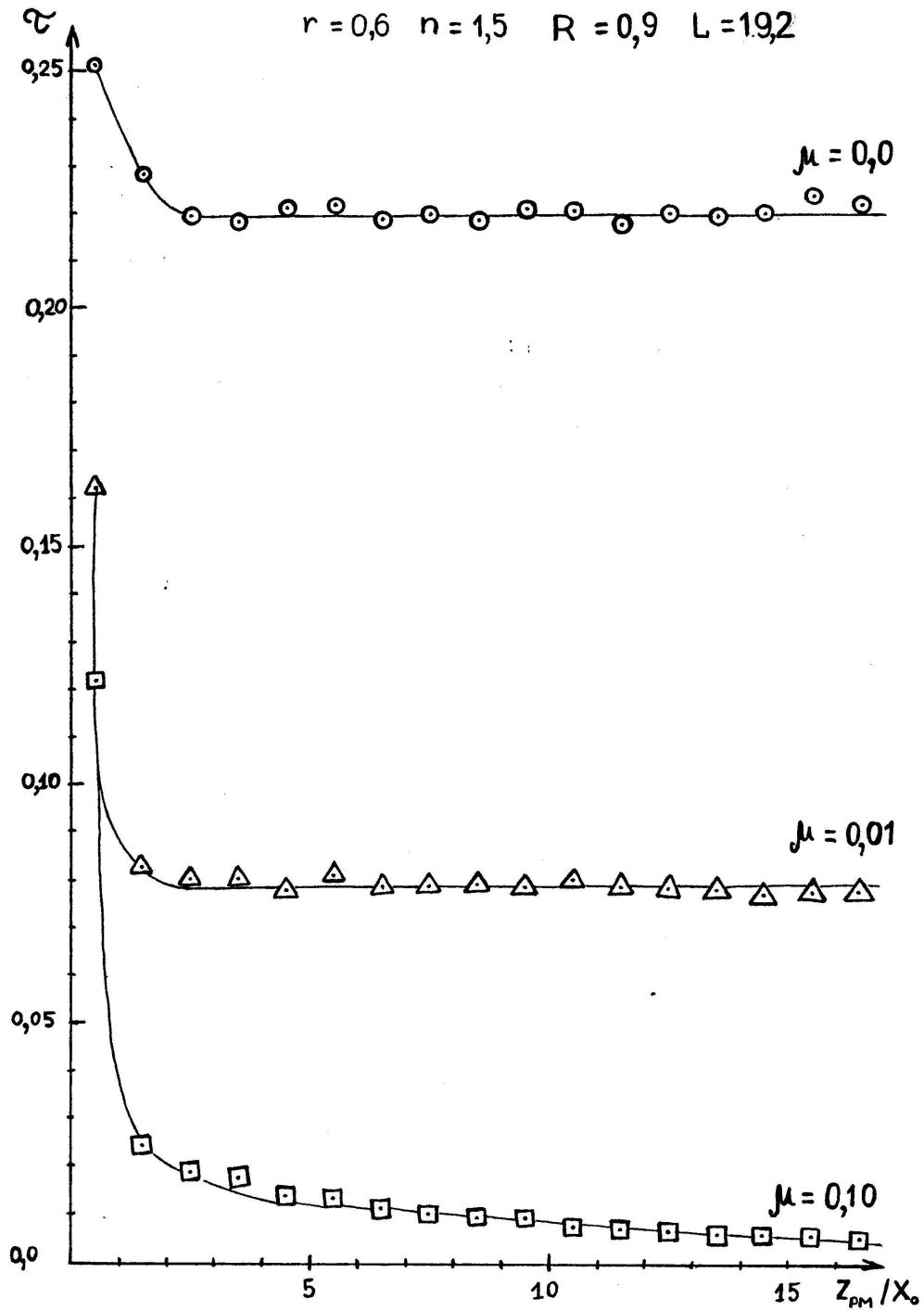


Рис. 17. Зависимость светосбора от Z при сборе на ФЭУ с ОК и при зеркальной обертке с коэффициентом отражения $R = 0,9$ для кристалла длиной 19,2 см — при различном поглощении μ .

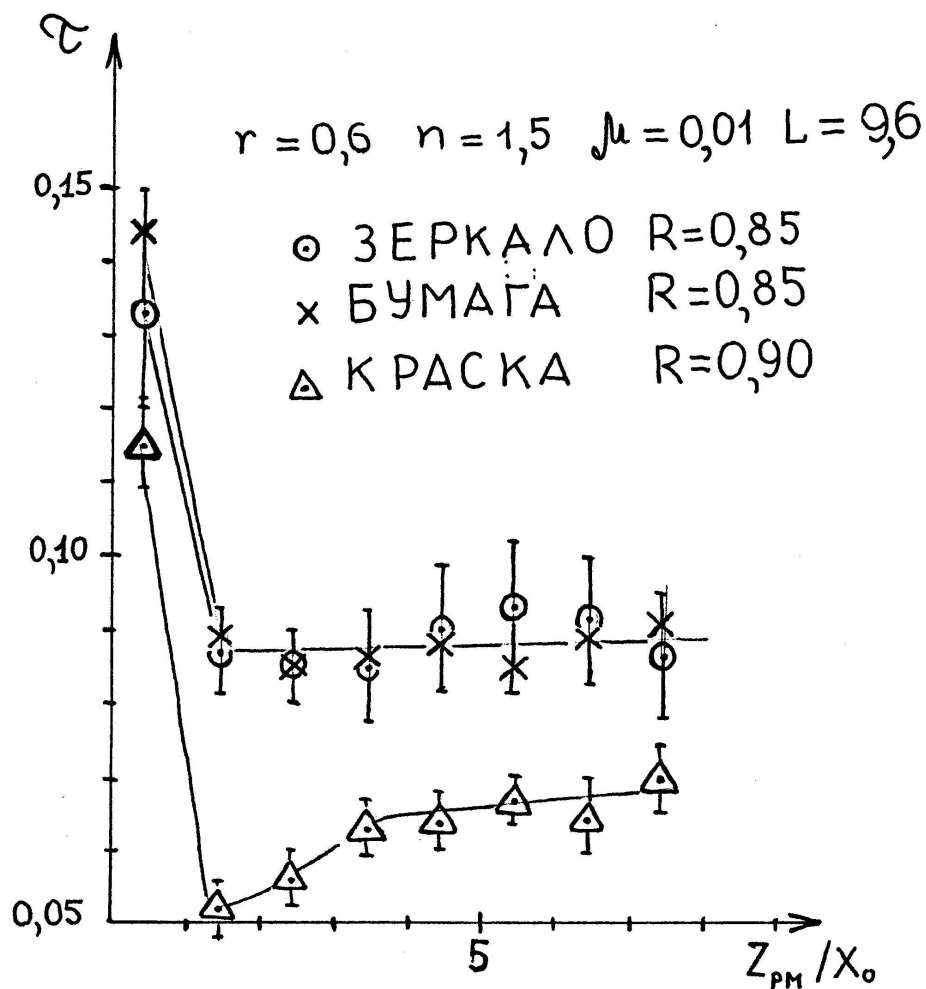


Рис. 18. Зависимость светосбора от Z при сборе на ФЭУ с ОК для кристаллов длиной 9,6 см при $\mu = 0.01/\text{см}$ и для разного окружения:
 $\circ$ — зеркальная обертка,
 $\times$ — обертка белой бумагой,
 Δ — покрытие белой краской.

$$r = 0,6 \quad n = 1,5 \quad \mu = 0,01 \quad L = 19,2$$

○ ЗЕРКАЛО $R = 0,85$
 × БУМАГА $R = 0,85$
 Δ КРАСКА $R = 0,90$

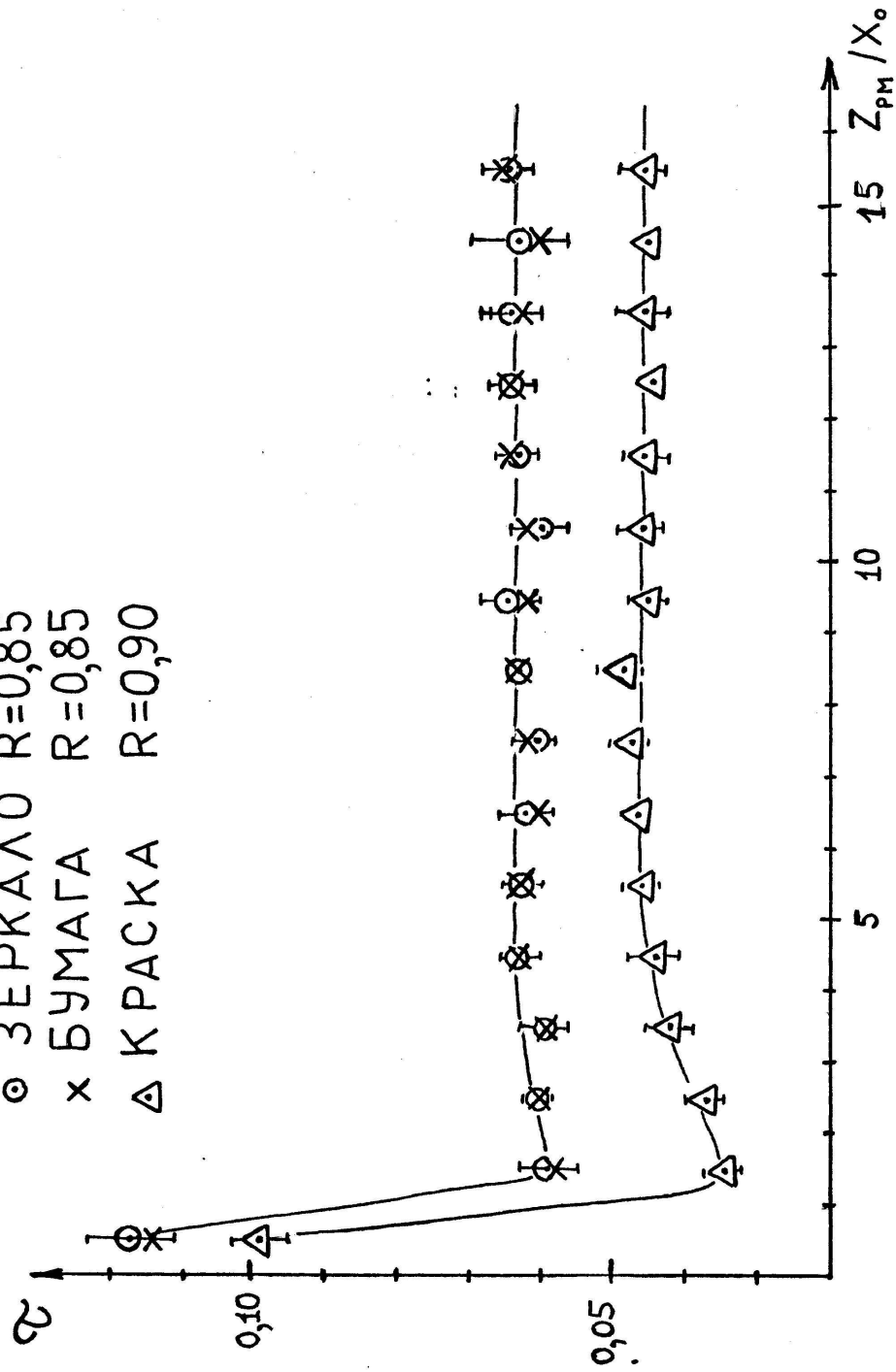


Рис. 19. Зависимость светосбора от Z при сборе на ФЭУ с ОК для кристаллов длиной 19,2 см при $\mu = 0,01/\text{см}$ и для разного окружения: ○ - зеркальная обертка; × - обертка белой бумагой; Δ - покрытие белой краской.

Отражение света шероховатой поверхностью является суперпозицией зеркального и диффузного процессов отражения [11] :

$$I(\theta, \varphi) = p(\theta) \cdot I_m(\theta, \varphi) + [1 - p(\theta)] I_D(\theta, \varphi),$$

I_m - интенсивность зеркальной или френелевской составляющей,

I_D - интенсивность диффузной составляющей, $p(\theta)$ - вероятность

зеркального отражения. Направление движения диффузно отраженного

фотона не зависит от угла падения фотона. Интенсивность диффузного

отражения определяется законом Ламберта: $I_D(\theta, \varphi) = I_0 \cdot R \cdot \cos \theta / \pi$,

где R - коэффициент отражения.

Результаты представлены в табл. 13, 14 и на рис. 18 и 19.

Обертка бумагой дала результаты, совпадающие с данными для зеркальной обертки при одинаковом $R = 0,85$.

Покрытие белой краской оказалось неэффективно - падает светосбор и растет его неоднородность.

По технологическим причинам был рассмотрен вариант, когда на собирающей грани вокруг ФЭУ нет отражающей обертки. При зеркальной обертке с $R = 0,9$ и поглощении $\mu = 0,01/\text{см}$ были получены такие значения светосбора от средней точки кристалла:

Длина кристалла:	9,6 см	19,2 см
есть обертка на собирающей грани	$\tau = 0,115 \pm 0,005$	0.079 ± 0.004
нет обертки на собирающей грани	$\tau = 0,095 \pm 0,005$	$0.067 \pm 0,004$

т.е. наблюдается некоторая потеря светосбора.

При этом без обертки на $\sim 10\%$ возрастает неоднородность светосбора.

5.2г. Поперечная неоднородность светосбора

При изучении светосбора на ФЭУ была замечена сильная поперечная неоднородность светосбора вблизи собирающей грани - рис. 20.

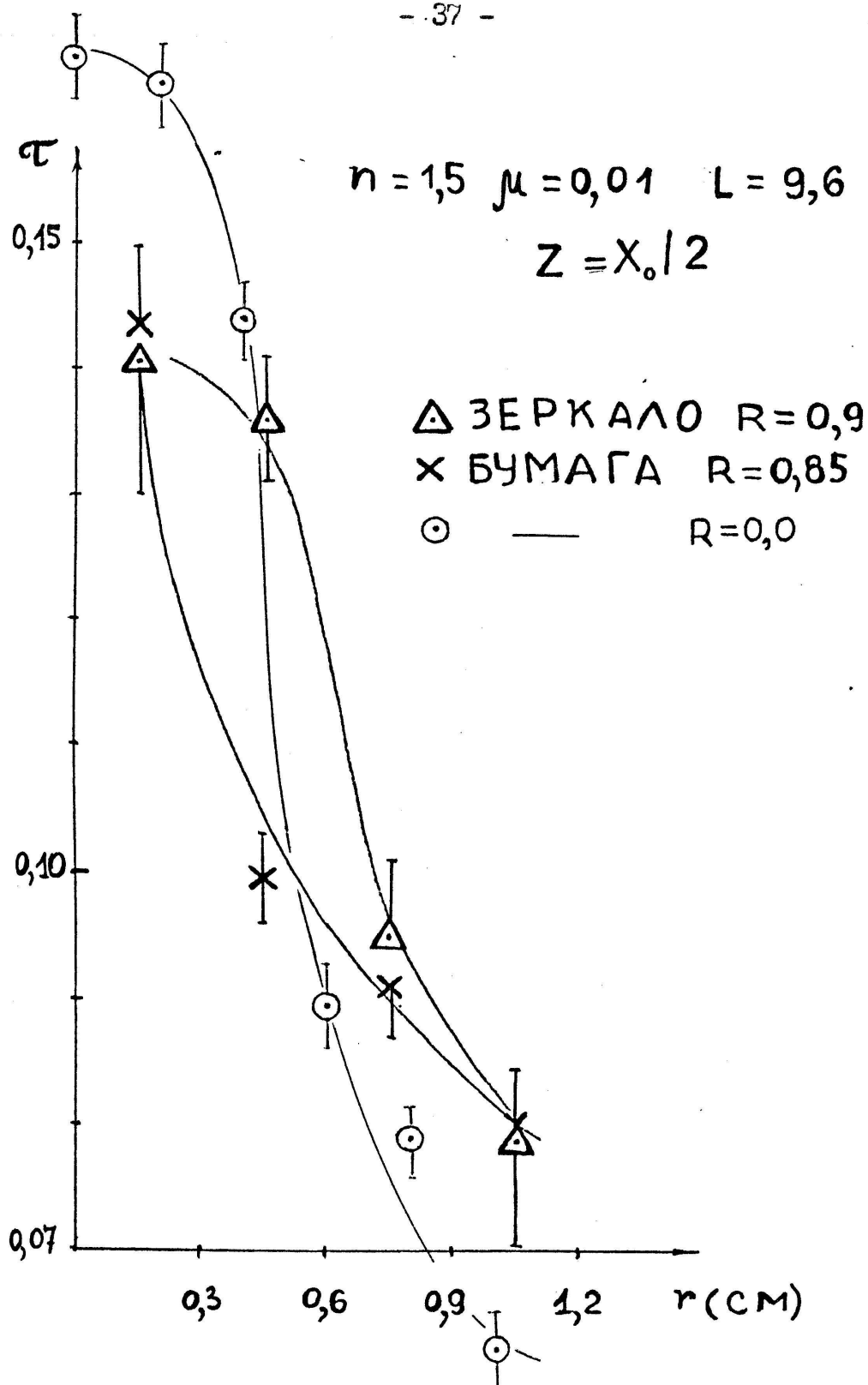


Рис.20. Зависимость светосбора в поперечной плоскости от расстояния r от оси кристалла (для плоскости, находящейся на расстоянии $X_0/2$ от ФЭУ) при сборе на ФЭУ с ОК. Длина кристалла 9,6 см, $\mu = 0,01/\text{см}$.

Типы окружения кристалла:

- $\odot$ - без обертки ($R = 0$),
- Δ - зеркальная обертка с $R = 0,9$,
- $\times$ - диффузная обертка с $R = 0,9$.

$$n = 1,5 \quad \mu = 0,01 \quad L = 9,6$$

$$z = L/2$$

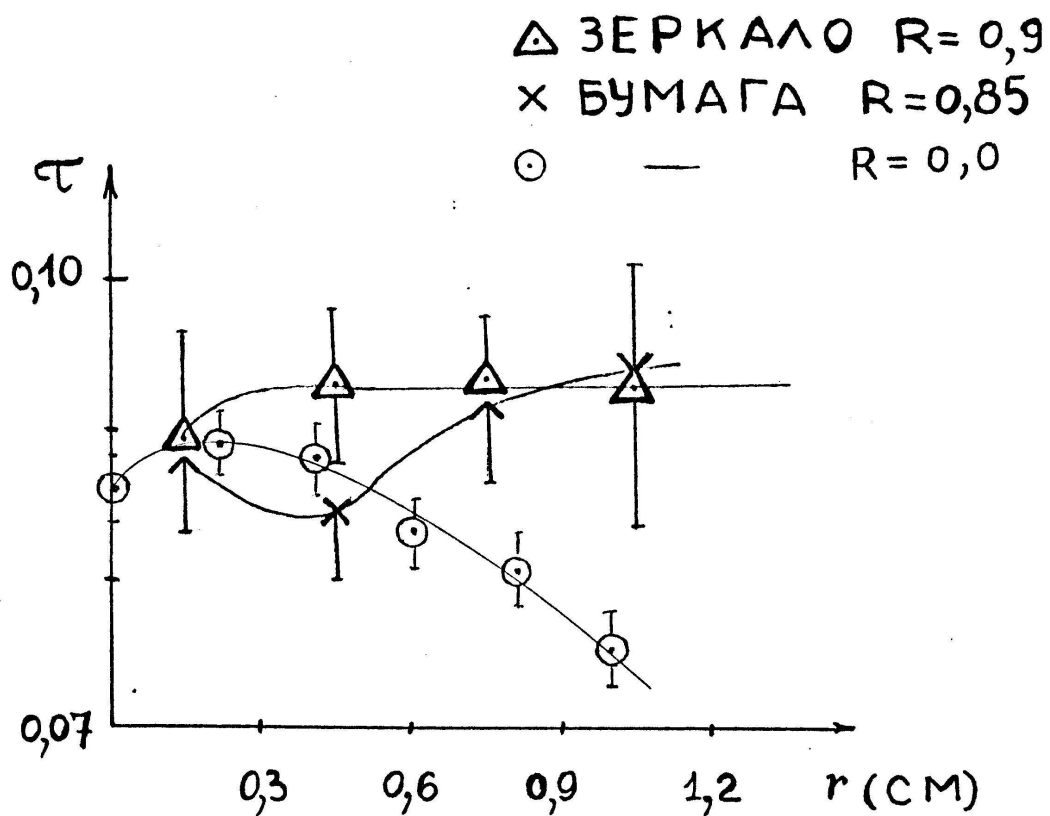


Рис.21. То же, что и на рис.20, но для плоскости, находящейся на середине длины кристалла.

Напомним, что при сборе на всю грань без ОК в кристалле длиной $L = 9,6$ см с сильным поглощением $\mu = 0,10/\text{см}$ и $R = 0$ неоднородность светосбора в поперечной плоскости при $Z = X_0/2$ составила пренебрежимо малую величину $\Delta \tau \sim 0,7\%$, находящуюся за пределами точности наших расчетов.

При определении светосбора на ФЭУ с кристалла той же длины, но с $\mu = 0,01/\text{см}$ были получены данные для зависимости светосбора в поперечной плоскости от расстояния от оси кристалла при разных положениях плоскости Z - рис. 20 и 21. Видно резкое убывание светосбора при удалении точки излучения от оси кристалла для области, близкой к ФЭУ ($Z = X_0/2$, рис. 20) и ослабление этой зависимости при удалении от ФЭУ ($Z = L/2$, рис. 21). Из рис. 20 следует, что зеркальная обертка предпочтительнее, т.к. она дает однородный светосбор вплоть до $r \sim h/2$ ($2h = 2,4$ см - сторона сечения кристалла).

Наиболее сильна поперечная неоднородность для "голых" кристаллов ($R = 0$). Применение высокоотражающей обертки почти выравнивает светосбор при $Z = L/2$ и снижает его неоднородность вблизи ФЭУ.

Поперечные неоднородности светосбора для разных условий в целом оказались таковы:

ФЭУ без ОК	$\Delta \tau_{\perp} (Z = X_0/2)$	$\Delta \tau_{\perp} (Z = L/2)$
$R = 0,9$	90%	40%
(10)		
ФЭУ с ОК		
а) $R = 0,9$	56%	4%
б) $R = 0$	94%	14%

Видно, что для повышения однородности светосбора в поперечной плоскости при сборе на ФЭУ необходимо применять

- ОК ФЭУ с кристаллом,
- зеркальную обертку кристаллов.

5.3. Выводы

Полученные нами результаты по светосбору с кристаллов ОГВ при разных условиях (см. табл. I5) позволяют сделать следующие выводы.

1. Преимущественным является светосбор на всю грань. В этом случае для прозрачных кристаллов и при ОК фотоприемника светосбор однороден и составляет $\sim 23\%$. Если ОК отсутствует, то светосбор, сохраняя свою однородность, падает до $\sim 5,6\%$, но он может быть увеличен до $\sim 11\%$ введением зеркальной обертки с $R = 0,9$ на торце, противоположном собирающей грани.

При сборе на всю грань характеристики светосбора сохраняются и при появлении слабого поглощения с $\mu = 0,01/\text{см}$.

При сильном поглощении ($\mu = 0,10/\text{см}$) светосбор падает и становится неоднородным.

2. Использование для регистрации света ФЭУ с малой площадью фотокатода ($\sim 0,2$ от площади собирающей грани в нашем случае) приводит к ряду проблем даже для прозрачных кристаллов.

а) При сборе на ФЭУ без ОК светосбор при $R = 0$ падает до 1% . Появляется резкое падение светосбора с удалением от ФЭУ, обусловленное убыванием телесного угла для прямого света. Введение зеркальной обертки с $R = 0,9$ примерно в 5 раз увеличивает светосбор и в 4,5 раза (до 22%) уменьшает его продольную неоднородность.

б) Введение смазки с $n = 1,5$ между ФЭУ и кристаллом заметно меняет ситуацию. Светосбор возрастает до 18% (что близко к сбору на всю грань), но сохраняется его продольная неоднородность на уровне, соответствующем ФЭУ без ОК. Введение отражающей обертки несколько увеличивает светосбор и вдвое — до 13% уменьшает его продольную неоднородность.

При слабом поглощении ($\mu = 0,01/\text{см}$) для кристалла длиной $9,6 \text{ см}$ $\tau = 11\%$, а $\Delta\tau = 49\%$ для $R = 0,9$.

3. При сборе на ФЭУ малой площади имеется сильная поперечная неоднородность светосбора вблизи ФЭУ.

6. Моделирование сигнала ЭМ калориметра с учетом светосбора

Моделирование с учетом светосбора проводилось для калориметра ЭМК-2 с реалистическими (и оптимизированными) условиями светосбора с кристаллов: ФЭУ в оптическом контакте, поглощение $\mu = 0,01/\text{см}$, зеркальная обертка с $R = 0,9$.

При этом в EGS' при каждой энергии информация об энерговыделении каждого ливня с пространственным шагом $0,3 \times 0,3 \times 1,2 \text{ см}^3$ записывалась на ленту. Всего было записано по 1000 ливней для энергий электронов 0,5 , 1.0 , 2,0 и 3,0 ГэВ.

Светосбор для кристаллов длиной 9,6 и 19,2 см также рассчитывался с указанным пространственным разбиением..

Такая организация работы позволяет на однажды сгенерированном банке ливней (именно это требует основных затрат компьютерного времени) впоследствии быстро получать результаты для различных вариантов светосбора.

Сигнал с ЭМ калориметра в этом случае определялся путем взвешивания выделившейся энергии с пространственными коэффициентами светосбора. Последнее возможно в силу того, что в сцинтилляторах излученный свет пропорционален поглощенной энергии. Для ОГВ световыход составляет $\sim 1 \text{ фотон}/250 \text{ эВ}$.

Профили сигналов фитировались выражением (2), полученное энергетическое разрешение приведено в табл. I6 (для удобства сравнения повторена часть данных из табл. 6). Представлены результаты для всего калориметра и отдельно для центрального кристалла (MI).

Для центрального кристалла в пределах нашей точности разрешение не зависит от светосбора, определяясь целиком флуктуациями утечек.

Для всего калориметра ухудшение разрешения под влиянием неоднородности светосбора наблюдается только при энергии 0,5 ГэВ, где

эффект составляет всего $\sim 2,5\%$. Для энергий $E_0 \geq 1$ ГэВ светосбор не оказывает влияния на разрешение калориметра при имеющемся уровне утечек.

Аналогичный результат был получен в [7] для кристалла NaI длиной 35 см.

Напомним, что продольная неоднородность светосбора наблюдается при выбранных нами условиях только для $Z \leq X_0$ (рис. 16 и 17). Там же, в основном, сосредоточена и поперечная неоднородность — см. п. 5.2г.

Продольные профили ливней в ОГВ таковы (рис. 22), что в области $Z \leq X_0$ выделяется $\sim 8\%$ поглощаемой энергии при $E_0 = 0,5$ ГэВ и $\sim 2\%$ — при $E_0 = 3,0$ ГэВ. Это согласуется с тем, что слабый при $E_0 = 0,5$ ГэВ вклад в разрешение от неоднородности светосбора исчезает с ростом энергии.

В табл. 16 приведены и величины $E_m = \max(E_{\alpha\beta\gamma}/E_0)$. При учете светосбора вместо $E_{\alpha\beta\gamma}$ входит $E_{\alpha\beta\gamma} \cdot \tau$. Это позволяет из отношения величин E_m при учете светосбора и без него получить среднюю величину $\langle \tau \rangle$. Для всех четырех энергий среднее по объему и структуре ливня значение светосбора оказалось равным $\langle \tau \rangle = 6,7\%$.

Напомним, что величина светосбора в середине кристаллов для точек, лежащих на их осях, составляет $\sim 8\%$ ($L = 19,2$ см) и 11% ($L = 9,6$ см) — см. табл. 11 и 12. Т.к. $\sim 82\%$ поглощенной калориметром энергии выделяется в центральном кристалле, то можно именно к нему отнести наблюдаемый средний светосбор $\langle \tau \rangle = 6,7\%$ — вместо 8% для осевых точек (с $Z > X_0$).

Из данных табл. 16 также следует, что калориметр ЭМК-2 сохраняет линейность отклика и при учете светосбора.

7. Резюме

Нами выполнена следующая работа по этой части х/д 141-88.

1. На ЕС ЭВМ в среде СВМ развернуто математическое обеспечение, позволяющее проводить полное Монте-Карло моделирование электромагнитных калориметров с учетом процессов светосбора вплоть до энергий в несколько ТэВ.

2. Изучены зависимости светосбора с кристаллов ОГВ от оптических свойств кристаллов и от условий светособирания. На этой основе сформулированы рекомендации по оптимизации светосбора.

3. Проведено моделирование свойств ЭМ калориметров из ОГВ в зависимости от их структуры. Изучено влияние неоднородности светосбора с кристаллов ОГВ на энергетическое разрешение калориметров и их отклик при разных энергиях.

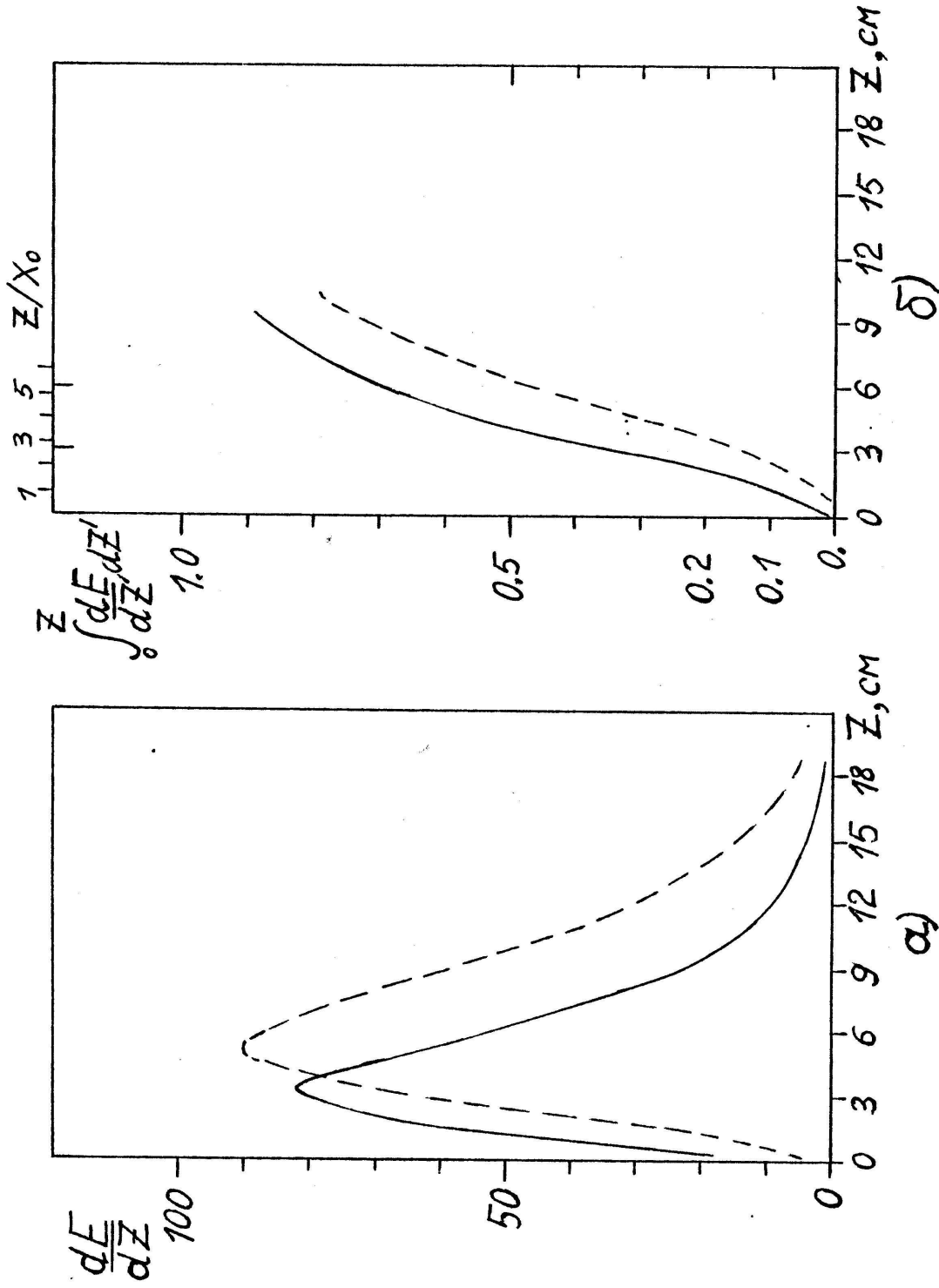


Рис.22. а) - Продольный профиль ливня в ОГВ
при энергии 0,5 ГэВ(—) и 3,0 ГэВ(---).
б) - Нормированные интегралы профилей,
приведенных на рис. а).

Л и т е р а т у р а

- I. Schneegans M. NIM, A257, 528-537(1987).
2. Proceedings of the International Workshop on Bismuth Germanate, Princeton University, Dep. of Physics, Nov.10-13, 1982, 596-619.
3. Аксенов Г.А. Новосибирск, 1985, ИЯФ СОАН СССР, препринт 85-II8.
4. R.L. Ford, W.R.Nelson. The EGS Code System. SLAC-210, 1978.
5. W.R.Nelson, H.Hirayama, D.W.O.Rogers. The EGS4 Code System. SLAC-report-265, 1985.
6. Massam T. CERN-76-21, 1976 (revised on 11.05.82).
7. Китаев Д.Ф. Исследование влияния флуктуаций электромагнитных ливней и процесса светосбора на спектрометрические характеристики ливневых спектрометров. Кандидатская диссертация. МИФИ, М., 1981.
8. Шутько В.Е. Программа LGUIDE . ИТЭФ.
9. Белоусов А.С. ГАММА-программа для расчета светособирания в радиаторах спектрометров. Препринт ФИАН №144, М., 1980.
10. S.Iwata. Calorimeter. Nagoya University, preprint DPNU-13-80, 1980.
- II. Цирлин Ю.А. Светособирание в сцинтилляционных счетчиках. Кн., М., 1975.

Таблица 1.

Свойства сцинтилляторов, применяемых в электромагнитных калориметрах: (BGO , $NaI(Tl)$, $CsI(Tl)$).

Характеристика	Сцинтилляторы		
	BGO	$NaI(Tl)$	$CsI(Tl)$
Плотность ρ (г/см ³)	7,13	3,67	4,41
Ядерная длина взаимодействия (см)	22	41	36
Радиационная длина X_0 (см)	1,12	2,59	1,86
Радиус Молера R_M (см)	2,4	4,4	3,8
Критическая энергия E_c (МэВ)	9,8	12,5	10,4
Длина волны в максимуме спектра излучения (нм)	480	410	550
Показатель преломления n	2,15	1,85	1,80
Относительный световыход (%)	10-20	100	45
Время высвечивания (нсек)	350	230	1000
Число фотонов на МэВ	$(0,4 \pm 0,8) \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	

Таблица 2.

Относительное энергосодержание в калориметре (из 9 кристаллов длиной 9,6 см) и в отдельных модулях.

Энергия электронов E_0 (ГэВ)	Число ливней	Поглощенная энергия (%)			
		Всего	M1	M2	M3
0,5	1000	$82,2 \pm 0,3$	$70,6 \pm 0,3$	$8,8 \pm 0,2$	$2,7 \pm 0,1$
1,0	1000	$77,7 \pm 0,3$	$67,5 \pm 0,3$	$7,8 \pm 0,1$	$2,30 \pm 0,04$
2,0	1000	$72,7 \pm 0,3$	$64,0 \pm 0,25$	$6,7 \pm 0,1$	$2,06 \pm 0,03$
3,0	1000	$69,5 \pm 0,3$	$61,5 \pm 0,3$	$6,12 \pm 0,05$	$1,85 \pm 0,02$

Таблица 3.

То же, что и в таблице 2, но для полной сборки
длиной 19,2 см из 17 кристаллов.

Энергия элек- тронов (ГэВ)	Число лив- ней	Поглощенная энергия (%)			
		Всего	М1	М2 (М2В)	М3 (М3В)
0,5	1360	92,7±0,1	76,0±0,2	12,3±0,2 (3,7±0,1)	4,3±0,1 (1,7±0,05)
1,0	860	92,6±0,1	75,7±0,2	12,4±0,2 (4,7±0,1)	4,4±0,1 (2,0±0,04)
2,0	430	92,2±0,1	75,7±0,1	12,3±0,2 (5,5±0,1)	4,3±0,1 (2,15±0,04)
3,0	300	92,1±0,1	75,7±0,2	12,1±0,2 (5,7±0,1)	4,3±0,1 (2,4±0,05)

Таблица 4.

Утечки из калориметра длиной 9,6 см.

Энергия электронов E_0 (ГэВ)	Вытекающая энергия (%)		
	вперед	назад	боковые грани
0,5	13,6±0,3	0,22±0,01	4,0±0,1
1,0	18,5±0,3	0,15±0,01	3,6±0,1
2,0	24,0±0,3	0,11±0,01	3,14±0,04
3,0	27,6±0,3	0,09±0,01	2,84±0,03

Таблица 5.

Утечки из калориметра длиной 19,2 см.

Энергия электронов E_0 (ГэВ)	Вытекающая энергия (%)		
	вперед	назад	боковые грани
0,5	$0,10 \pm 0,01$	$0,30 \pm 0,01$	$6,0 \pm 0,1$
1,0	$0,14 \pm 0,01$	$0,23 \pm 0,01$	$5,9 \pm 0,1$
2,0	$0,19 \pm 0,01$	$0,18 \pm 0,01$	$6,0 \pm 0,1$
3,0	$0,20 \pm 0,01$	$0,14 \pm 0,01$	$5,8 \pm 0,1$

Таблица 6 Энергетическое разрешение σ_E/E_m всего калориметра (ЭМК) и центрального кристалла (МІ) для двух вариантов ЭМК.

E_0 , ГэВ	Величина	ЭМК-1		ЭМК-2	
		ЭМК	МІ	ЭМК	МІ
0.5	$\frac{\sigma_E}{E_m}$, %	$6,8 \pm 0,4$	$8,4 \pm 0,5$	$3,5 \pm 0,1$	$6,8 \pm 0,3$
	E_m	$0,87 \pm 0,01$	$0,75 \pm 0,01$	0.93	0.79
	χ^2/N_{DF}	18./11	15./12	17./16	25./26
1.0	$\frac{\sigma_E}{E_m}$, %	$7,2 \pm 0,4$	$7,2 \pm 0,5$	$2,9 \pm 0,2$	$5,1 \pm 0,2$
	E_m	$0.83 \pm 0,01$	$0,71 \pm 0,01$	0.90	0.77
	χ^2/N_{DF}	16./12	7,8/8	5./9	11./19
2.0	$\frac{\sigma_E}{E_m}$, %	$8,2 \pm 0,4$	$8,1 \pm 0,4$	$2,3 \pm 0,1$	$3,5 \pm 0,2$
	E_m	$0,80 \pm 0,01$	$0.69 \pm 0,01$	0.90	0.76
	χ^2/N_{DF}	6.4/12	9,5/10	26./18	25./24
3.0	$\frac{\sigma_E}{E_m}$, %	$8,5 \pm 0,4$	$8,0 \pm 0,4$	$2,0 \pm 0,1$	$3,2 \pm 0,2$
	E_m	$0.75 \pm 0,01$	$0.66 \pm 0,01$	0.89	0.76
	χ^2/N_{DF}	10./13	14./10	11./7	7./9

Таблица 7.

Зависимость светосбора от μ и R для кристалла
длинной 9,6 см при сборе со всей грани без смазки
($P_{lim} = 1000$ см).

μ , см ⁻¹	0,01	0,01	0,01	0,10	0,10	0,10
R	0	0,7	0,9	0	0,7	0,9
Z , см			τ			
0,56	0,051 ± 3	0,079 ± 4	0,090 ± 4	0,042 ± 3	0,045 ± 3	0,046 ± 3
1,68	0,051	0,079	0,090	0,038	0,041	0,043
2,80	0,050	0,078	0,090	0,034	0,038	0,041
3,92	0,050	0,078	0,089	0,030	0,035	0,038
5,04	0,049	0,078	0,089	0,027	0,033	0,035
6,16	0,049	0,078	0,089	0,025	0,032	0,034
7,28	0,048	0,078	0,089	0,022	0,030	0,032
8,40	0,048	0,078	0,089	0,020	0,029	0,031
9,52	0,048 3	0,077 4	0,089 4	0,019 2	0,028 2	0,031 2
$\Delta\tau$, %	7,0	2,1	0,6	78	48	41

Таблица 8.

То же, что и в таблице 7, но для длины кристалла
19,2 см ($P_{lim} = 2000$ см).

$n, \text{см}^{-1}$	0,01	0,01	0,01	0,10	0,10	0,10
R	0	0,7	0,9	0	0,7	0,9
$Z, \text{см}$			τ			
0,56	0,050 ± 4	0,072 ± 5	0,079 ± 5	0,042 ± 3	0,042 ± 3	0,042 ± 3
1,68	0,049	0,071	0,080	0,037	0,037	0,037
2,80	0,049	0,071	0,080	0,033	0,033	0,033
3,92	0,048	0,071	0,079	0,029	0,030	0,030
5,04	0,048	0,071	0,079	0,026	0,027	0,027
6,16	0,047	0,070	0,079	0,023 2	0,024	0,024
7,28	0,047	0,069	0,079	0,021	0,021 2	0,022
8,40	0,047	0,069	0,079	0,018	0,019	0,020 2
9,52	0,046	0,069	0,078	0,016	0,017	0,018
10,64	0,046	0,069	0,078	0,014	0,016	0,016
11,76	0,045	0,069	0,078	0,013	0,014	0,015
12,88	0,045	0,068	0,078	0,011	0,013	0,014
14,00	0,044	0,068	0,078	0,010	0,012	0,013
15,12	0,044	0,068	0,078	0,009	0,011	0,012
16,24	0,044	0,068	0,078	0,008	0,011	0,012
17,36	0,043	0,068	0,078	0,008	0,010	0,011
18,48	0,043	0,068	0,078	0,007 I	0,010 I	0,011 I
$\Delta\tau, \%$	15	5,7	2,2	143	122	116

Таблица 9.

Зависимость светосбора от μ и R для кристалла длиной 9,6 см при сборе с торца на ФЭУ без смазки ($P_{\text{лим}} = 1000 \text{ см}$).

$\mu, \text{см}^{-1}$	0	0	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,10	0,10	0,10
R	0	0,7	0,9	0	0	0,9	0	0	0,7	0,9
$Z, \text{см}$										
0,56	0,045 ₊₂	0,061 ₊₅	0,079 ₊₆	0,045 ₊₃	0,054 ₊₄	0,062 ₊₄	0,042 ₊₃	0,041 ₊₃	0,042 ₊₃	0,042 ₊₃
1,68	0,026	0,045	0,068	0,026	0,036	0,046	0,021	0,021	0,021	0,021
2,80	0,012	0,035	0,062	0,012	0,025	0,038	0,008	0,008	0,008	0,010
3,92	0,008	0,030	0,057 ₄	0,008	0,022	0,035	0,005	0,006	0,006	0,008
5,04	0,011	0,033	0,059	0,012	0,025	0,038	0,006	0,008	0,008	0,008
6,16	0,012	0,033	0,059	0,011	0,025	0,038	0,005	0,008	0,008	0,008
7,28	0,013 _I	0,035	0,060 ₅	0,012	0,026	0,039	0,005	0,008	0,008	0,008
8,40	0,012 _I	0,035	0,063	0,012	0,026	0,040	0,005	0,007	0,007	0,008
9,52	0,011 _I	0,035 ₃	0,062	0,011	0,026	0,040	0,005	0,007 _I	0,007 _I	0,008 _I
$\Delta T, \%$	I2I	55	23	II5	70	43	I6I	I4I	I37	

То же, что и в таблице 9, но для кристалла длиной 19,2 см ($R_{lim} = 2000$ см).

$M, \text{см}^{-1}$	0	0	0	0,01	0,01	0,01	0,10	0,10	0,10
R	0	0,7	0,9	0	0,7	0,9	0	0,7	0,9
$Z, \text{см}$					τ				
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,56	0,046 ₂	0,061 ₄	0,078 ₅	0,046 ₃	0,053 ₄	0,058 ₅	0,043 ₂	0,042 ₂	0,042 ₂
1,68	0,027	0,043	0,065	0,026	0,035	0,041	0,023	0,021	0,021
2,80	0,012 _I	0,032	0,057	0,012	0,022	0,030	0,009	0,008	0,008
3,92	0,008	0,030	0,057	0,008	0,019	0,028	0,006	0,005	0,005
5,04	0,012	0,033	0,060	0,012	0,023	0,031	0,007	0,006	0,006
6,16	0,013	0,034	0,062	0,010	0,021	0,030	0,006	0,005	0,005
7,28	0,013	0,033	0,058	0,012	0,022	0,031	0,006	0,005	0,005
8,40	0,012	0,034	0,060	0,012	0,022	0,031	0,005	0,004	0,004
9,52	0,011	0,035	0,060	0,011	0,021	0,029	0,004	0,003	0,003
10,64	0,013	0,038	0,065	0,012	0,021	0,030	0,004	0,004	0,004
11,76	0,013	0,032	0,057	0,012	0,021 ₂	0,029 ₂	0,003	0,003	0,003
12,88	0,012	0,032	0,056	0,012	0,021	0,029	0,002	0,003	0,003

Окончание таблицы 10.

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10
14,00	0,012	0,034	0,060	0,011	0,021	0,030	0,002	0,003	0,003
15,12	0,012	0,034	0,059	0,010	0,020	0,028	0,002	0,003	0,003
16,24	0,011	0,034	0,059	0,009	0,020	0,029	0,002	0,002	0,003
17,36	0,010	0,034	0,061	0,009	0,018	0,027	0,002	0,002	0,003
18,48	0,009 ₁	0,029 ₃	0,055 ₄	0,009 ₁	0,018 ₂	0,026 ₂	0,002	0,003	0,003
$\Delta T, \%$	132	70	35	136	101	76	200	177	175

Таблица II.

Зависимость светосбора от μ и R для кристалла
длиной 9,6 см при сборе с торца на ФЭУ с ОК.

$\mu, \text{см}^{-1}$	0.	0.	0.	0.01	0.01	0.01	0.10	0.10	0.10
R	0.	0.7	0.9	0.	0.7	0.9	0.	0.7	0.9
$Z, \text{см}$				τ					
0.56	0.226 ₆	0.238 ₇	0.255 ₇	0.168 ₆	0.176 ₆	0.185 ₆	0.123 ₆	0.124 ₆	0.124 ₆
1.68	0.194	0.211	0.234	0.095	0.106	0.118	0.027	0.028	0.029
2.80	0.177	0.196	0.225	0.088	0.101	0.116	0.022	0.024	0.024
3.92	0.175	0.195	0.223	0.086	0.100	0.115	0.021	0.023	0.023
5.04	0.178	0.197	0.225	0.084	0.097	0.112	0.018	0.019	0.020
6.16	0.178	0.197	0.225	0.084	0.102	0.116	0.017	0.019	0.020
7.28	0.177	0.196	0.224	0.086	0.099	0.114	0.016	0.018	0.019
8.40	0.178	0.198	0.227	0.085	0.100	0.115	0.015	0.018	0.019
9.52	0.178 ₆	0.198 ₆	0.226 ₆	0.088 ₄	0.102 ₄	0.117 ₄	0.015 _I	0.017 _I	0.018 _I
$\Delta\tau, \%$	25.	20.	13.	67.	58.	49.	157.	152.	149.

Таблица 12.

То же, что и в табл. II, но для кристалла длиной 19,2 см.

μ , см ⁻¹	0.	0.	0.	0.01	0.01	0.01	0.10	0.10	0.10
R	0.	0.7	0.9	0.	0.7	0.9	0.	0.7	0.9
Z , см					τ				
0.56	0.223 ±7	0.234 ±7	0.251 ±7	0.152 ±6	0.158 ±6	0.162 ±6	0.121 ±6	0.121 ±6	0.121 ±6
1.68	0.188	0.204	0.228	0.068	0.076	0.083	0.024	0.024	0.024
2.80	0.172	0.191	0.219	0.062	0.072	0.081	0.019	0.019	0.019
3.92	0.170	0.189	0.218	0.061	0.071	0.080	0.018	0.018	0.018
5.04	0.174	0.193	0.221	0.059	0.069	0.078	0.014	0.014	0.014
6.16	0.174	0.193	0.222	0.062	0.072	0.081	0.013	0.014	0.014
7.28	0.171	0.190	0.219	0.060	0.070	0.079	0.011	0.012	0.012
8.40	0.172	0.192	0.220	0.060	0.070	0.079	0.010	0.011	0.011
9.52	0.172	0.191	0.219	0.060	0.070	0.079	0.009	0.010	0.010
10.64	0.174	0.193	0.221	0.060	0.070	0.079	0.008	0.008	0.009
11.76	0.173	0.192	0.221	0.061	0.071	0.080	0.007	0.008	0.008
12.88	0.170	0.189	0.218	0.060	0.070	0.079	0.007	0.007	0.007
14.00	0.172	0.192	0.220	0.059	0.069	0.078	0.006	0.007	0.007
15.12	0.173	0.192	0.219	0.059	0.070	0.078	0.005	0.006	0.006
16.24	0.173	0.192	0.220	0.058	0.069	0.078	0.005	0.005	0.006
17.36	0.176	0.196	0.224	0.058	0.069	0.078	0.005	0.005	0.006
18.48	0.173 6	0.193 6	0.221 6	0.058 3	0.069 3	0.078 3	0.004	0.005	0.005
$\Delta\tau$, %	31.	21.	14.	90.	78.	70.	187.	184.	184.

Таблица 13.

Сравнение светосбора для зеркально отражающих и
диффузных покрытий кристалла ОГВ.

$\mu = 0,01$, кристалл длиной 9,6 см			
тип покр.	бумага бел.	краска бел.	зеркал.
R	0,85	0,90	0,85
Z , см		τ	
0,6	0,143 ₆	0,115 ₆	0,133 ₃
1,8	0,089 ₅	0,052 ₄	0,087 ₇
3,0	0,085 ₅	0,056 ₄	0,085 ₅
4,2	0,086 ₄	0,063 ₃	0,085 ₈
5,4	0,088 ₆	0,064 ₄	0,020 ₉
6,6	0,085 ₄	0,067 ₃	0,093 ₉
7,8	0,088 ₆	0,064 ₅	0,092 ₈
9,0	0,091 ₅	0,070 ₄	0,086 ₈
$\Delta \tau$, %	45	75	44

Таблица 14.

То же, что в таблице 13, но для кристалла длиной 19,2 см.

$\mu = 0,01$, кристалл длиной 19,2 см			
тип покр.	бумага бел.	краска бел.	зеркальн.
R	0,85	0,90	0,85
Z , см		τ	
I	2	3	4
0,6	0,114 ₅	0,098 ₄	0,117 ₆
1,8	0,058 ₃	0,034 ₃	0,058 ₄
3,0	0,060 ₅	0,037 ₃	0,060 ₂
4,2	0,060 ₅	0,042 ₃	0,059 ₃
5,4	0,063 ₅	0,043 ₄	0,063 ₃
6,6	0,063 ₄	0,046 ₃	0,062 ₂
7,8	0,060 ₅	0,046 ₂	0,062 ₄
9,0	0,062 ₅	0,047 ₃	0,061 ₃
10,2	0,063 ₄	0,048 ₄	0,063 ₄
11,4	0,062 ₄	0,045 ₃	0,065 ₃
12,6	0,063 ₄	0,045 ₃	0,060 ₄
13,8	0,064 ₃	0,045 ₃	0,063 ₃
15,0	0,064 ₅	0,044 ₂	0,064 ₃

Окончание таблицы 14.

I	2	3	4
16,2	0,063 ₄	0,046 ₄	0,063 ₄
17,4	0,060 ₃	0,045 ₂	0,063 ₇
18,6	0,065 ₃	0,046 ₃	0,064 ₃
$\Delta \tau$, %	62	90	66

Таблица I5 Светосбор от средней точки кристалла и его неоднородность $\Delta \tau$ для кристалла длиной 9,6 см в зависимости от условий светособирания при разных μ и R .

$\mu_{\text{см}^{-1}}$	R	Без смазки		Со смазкой	
		Сбор на всю грань	Сбор на ФЭУ	Сбор на всю грань	Сбор на ФЭУ
0.	0.	0.056 ± 4	0.012 ± 1	0.234 ± 7	0.178 ± 6
0.	0.9	0.108 8	0.059 4	0.278 7	0.225 6
0.01	0.	0.049 3	0.012 2		0.084 4
0.01	0.9	0.089 4	0.038 2		0.112 4
0.10	0.	0.027 2	0.006		0.018 2
0.10	0.9	0.035 2	0.008		0.020 2
0.01	0.9	0.089	0.038		0.112
	$\Delta \tau, \%$:	0.6%	43%		49%

Таблица I6

Энергетическое разрешение ЭМК-2 с учетом светосбора и без
учета светосбора

		С учетом светосбора		Без учета светосбора	
Энергия ГэВ		калориметр	MI	калориметр	MI
0.5	$\frac{\sigma_E}{E_m}, \%$	$4,0 \pm 0,2$	$7,0 \pm 0,3$	$3,5 \pm 0,1$	$6,8 \pm 0,3$
	E_m	0,06	0,05	0,93	0,79
	χ^2/N_{DF}	21./11	5./7	17./10	25./26
1.0	$\frac{\sigma_E}{E_m}, \%$	$3,0 \pm 0,1$	$5,0 \pm 0,2$	$2,9 \pm 0,2$	$5,1 \pm 0,2$
	E_m	0,06	0,05	0,90	0,77
	χ^2/N_{DF}	42./20	22./23	5./9	11./19
2.0	$\frac{\sigma_E}{E_m}, \%$	$2,6 \pm 0,1$	$3,6 \pm 0,2$	$2,3 \pm 0,1$	$3,5 \pm 0,2$
	E_m	0,06	0,05	0,90	0,76
	χ^2/N_{DF}	16./14	14./15	26./18	25./24
3.0	$\frac{\sigma_E}{E_m}, \%$	$2,1 \pm 0,1$	$3,0 \pm 0,2$	$2,0 \pm 0,1$	$3,2 \pm 0,2$
	E_m	0,06	0,05	0,89	0,76
	χ^2/N_{DF}	16./10	21./26	11./7	7./9