

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ԻՆՏԻՏՈՒՏ  
ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ԳԻՏԱԿԱՆ ՀԱՂՈՐԴՈՒՄ ՆԱՇՐԱԿ

НАУЧНОЕ СООБЩЕНИЕ

ЕФИ—140(75)

Յ.Տ.ԲԵԼՅԱԿՈՎ, Մ.Ս.ԼՈՐԻԿՅԱՆ.

Կ.Ջ.ՄԱՐԿԱՐՅԱՆ, Լ.Ա.ԴԵՎՈՐԿՅԱՆ

ՏՄ 4702523

РЕНТГЕНОВСКОЕ ПЕРЕХОДНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ  
В ПЕРИОДИЧЕСКИХ И НЕРЕГУЛЯРНЫХ СРЕДАХ

ԱՐՄԿ

ԵՐԵՎԱՆ

1975



ԵՐԵՎԱՆ

Scientific Report ЕФН-140(75)

E.S. BELYAKOV, M.P. LORIKYAN,  
K. Zh. MARKARYAN, L.A. GEVORKYAN

XTR IN REGULAR AND  
IRREGULAR MEDIA

*Ref*

The XTR-spectra in irregular media (styro-foam) in  $5 \div 25$  and  $25 \div 100$  KeV energy intervals are obtained. Experimental data satisfactorily agree with the TR theory for irregular radiators. The XTR yields are compared for regular and irregular media at different particle energies. Utilization of XTR in irregular media for the identification of particles is considered.

Yerevan Physics Institute  
Yerevan 1975

Э.С.БЕЛЯКОВ, М.П.ЛОРИКЯН  
К.Ж.МАРКАРЯН, Л.А.ГЕВОРКЯН

РЕНТГЕНОВСКОЕ ПЕРЕХОДНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ  
В ПЕРИОДИЧЕСКИХ И НЕРЕГУЛЯРНЫХ СРЕДАХ

*Реф.* Получены частотные спектры рентгеновского переходного излучения в нерегулярных средах (пенопласт) в интервале частот  $5 \div 25$  кэв и  $25 \div 100$  кэв. Проведенное сравнение экспериментальных данных с теорией РПИ для нерегулярных сред, дает удовлетворительное согласие. Дано сравнение выхода РПИ из регулярных и непериодических сред при различных энергиях излучающей частицы. Рассмотрена возможность применения РПИ для идентификации частиц.

Ереванский физический институт  
Ереван 1975

Э.С.БЕЛЯКОВ, М.П.ЛОРИКЯН  
К.Ж.МАРКАРЯН, Л.А.ГЕВОРКЯН

РЕНТГЕНОВСКОЕ ПЕРЕХОДНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ  
В ПЕРИОДИЧЕСКИХ И НЕРЕГУЛЯРНЫХ СРЕДАХ

Получены частотные спектры рентгеновского переходного излучения в нерегулярных средах (пенопласт) в интервале частот  $5 \div 25$  кэв и  $25 \div 100$  кэв. Проведенное сравнение экспериментальных данных с теорией РПИ для нерегулярных сред, дает удовлетворительное согласие. Дано сравнение выхода РПИ из регулярных и непериодических сред при различных энергиях излучающей частицы. Рассмотрена возможность применения РПИ для идентификации частиц.

Ереванский физический институт  
Ереван 1975

**Scientific Report ЕФН-140(75)**

**E.S. BELYAKOV, M.P. LORIKYAN,  
K.Zh. MARKARYAN, L.A. GEVORKYAN**

**XTR IN REGULAR AND  
IRREGULAR MEDIA**

The XTR-spectra in irregular media (styrofoam) in  $5 \div 25$  and  $25 \div 100$  KeV energy intervals are obtained. Experimental data satisfactorily agree with the TR theory for irregular radiators. The XTR yields are compared for regular and irregular media at different particle energies. Utilization of XTR in irregular media for the identification of particles is considered.

**Yerevan Physics Institute  
Yerevan 1975**

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Научное сообщение ЕФИ-140(75)

Э.С.БЕЛЯКОВ, М.П.ЛОРИКЯН,  
К.Ж.МАРКАРЯН, Л.А.ГЕВОРКЯН

РЕНТГЕНОВСКОЕ ПЕРЕХОДНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ  
В ПЕРИОДИЧЕСКИХ И НЕРЕГУЛЯРНЫХ СРЕДАХ

Ереван 1975

© *Ереванский физический институт, 1975*

В последние годы интерес к переходному излучению сильно возрос. Теперь уже не вызывает сомнения, что это явление имеет большие перспективы с точки зрения его применения для идентификации частиц сверхвысоких энергий.

Потребность в этих детекторах в настоящее время настолько велика, что группы, занимающиеся проблемой РПИ, в основном заняты разработками детекторов, в то время как вопросы исследования свойств этого излучения остались на втором плане. С другой стороны, в данное время общепризнано, что теория РПИ для регулярных сред превосходно описывает это явление. Поэтому вопросы её проверки теряют то значение, которое они имели всего лишь несколько лет тому назад.

Однако имеется еще большая область в физике РПИ, где необходимо проводить количественные проверки теории. Речь идет о переходном излучении в пористых средах. Эта проблема важна, с одной стороны, для лучшего понимания физических особенностей этого явления, а с другой стороны, вопросы применения пористых сред в качестве радиаторов сталкиваются с трудностями вычисления ожидаемого выхода излучения и его других характеристик. Понятно, что не всегда имеется возможность производить калибровку аппаратуры под пучком с известной энергией, поэтому последнее обстоятельство имеет

важное значение.

Нами ранее были опубликованы результаты исследования РПИ в пористых средах, [1-4], но тогда мы не могли воспользоваться теорией. В настоящее время имеется теория РПИ, развитая Г.М.Гарибяном и сотрудниками для нерегулярных сред, которая применима при любых нерегулярностях [5].

В этой теории авторами была рассмотрена система параллельных друг другу пластин с произвольными толщинами  $a$ , и расстояниями  $b$ . Такая система может служить хорошей моделью пористого радиатора, так как поперечные размеры электромагнитного поля заряженной частицы с частотой  $\omega$  имеют в вакууме порядок  $c\gamma/\omega$ , что для рентгеновских частот и  $E_e \gg 1,0$  Гэв составляет величину  $10^{-5}$  см. Кроме того, интенсивность переходного излучения не зависит от угла вылета заряда в вещество [6].

Согласно этой работе спектральное распределение среднего числа фотонов дается формулой:

$$\frac{dN}{d\omega} = \frac{e}{137\pi\omega} \int \left| \frac{1}{1-\beta^2\epsilon + \nu^2} - \frac{1}{1-\beta^2 + \nu^2} \right|^2 \nu^3 d\nu \quad (1)$$

где  $\omega$  и  $\nu$  - частота и угол излученного кванта,

$\beta = \frac{v}{c}$ ,  $v$  - скорость частицы

$\epsilon = \epsilon(\omega)$  - диэлектрическая проницаемость среды.

В случае учета поглощения излучения в среде радиатора величина 1 имеет вид.

$$\begin{aligned} \Gamma = & 2 \frac{1-p^N}{1-p} \cdot \operatorname{Re} \frac{[(1+p)/2 - ha] - [p - ha(1+p)/2] hb}{1 - ha hb} + \\ & + 2 \operatorname{Re} \frac{(1-ha)(p-ha)hb [p^N - ha^N hb^N]}{(1-ha hb)(p-ha hb)} \quad (2) \end{aligned}$$

где  $\rho = \overline{\exp(-2\mu a i)}$ ;  $h_a = \overline{\exp(-i\varphi a i)}$ ;  $h_b = \overline{\exp(-i\varphi_0 b i)}$ ;

$$\varphi_0 = \frac{\omega}{v} - \left(\frac{\omega^2}{c^2} - \chi^2\right)^{1/2}; \quad \varphi = \frac{\omega}{v} - \left(\frac{\omega^2}{c^2} \epsilon - \chi^2\right)^{1/2}; \quad \chi = \frac{\omega}{c} \sin \nu;$$

$\mu \approx -I_m \varphi$  - линейный коэффициент поглощения по амплитуде поля.

Данная работа посвящена исследованию РИИ в различных пористых средах и проверке теоретических предсказаний для пористых сред. Здесь же приведены результаты исследования РИИ в слоистом радиаторе при разных энергиях электронов.

Измерения проводились на экспериментальной установке, которая ранее описывалась [5], поэтому здесь мы приведем только наиболее важные её характеристики. Область энергетических спектров фотонов РПИ (5 ÷ 25) кэВ исследовалась пропорциональной многосекционной камерой, энергетическое разрешение которой при  $E_\gamma = 13,8$  кэВ составляло  $\pm 10\%$ . А в области  $\hbar\omega = (20 \div 100)$  кэВ использовался сцинтилляционный счетчик  $NaJ(Tl)$  с бериллиевым окном. Этот счетчик имел энергетическое разрешение при  $E_\gamma = 60$  кэВ  $\pm 16\%$ .  $\eta > 0,93$  для  $\hbar\omega > 25$  кэВ.

Все приведенные данные являются разностью результатов при измерении с радиаторами РИИ и плотными радиаторами с соответствующим количеством вещества.

Прежде чем приступить к обсуждению экспериментальных результатов, отметим некоторые особенности, связанные с вопросами количественного сравнения с теоретическими расчетами.

Так как значение  $l$  в выражении (2) зависит от вида распределения  $a$  и  $b$ , мы должны экспериментально определить эти распределения. Распределения  $b$  для пенопласта с плотностью  $\rho = 0,04$  [7] и  $0,025$  г/см<sup>3</sup>.

приведены на рис.1. Эти распределения хорошо описываются гамма-распределениями с  $\bar{b} = 410$  мк и  $\bar{b} = 600$  мк соответственно. Распределение  $\alpha$  нам не удалось измерить, так как перегородки между порами прозрачны и имеют неоднородную толщину по всем направлениям, их толшины очень малы ( $5 \div 7$  мк), и частицы в различных участках пор входят под разными углами.

На рис.2 приведены экспериментальные результаты и теоретические спектры излучения для пенопласта с длиной  $\ell = 10$  см,  $E_e = 3,0$  Гэв и  $\rho = 0,04$  г/см<sup>3</sup>.

Теоретические расчеты выполнены в предположении, что  $a$  и  $b$  подчиняются гамма распределениям со своими нерегулярностями

$$\zeta_a = \frac{(\Delta a^2)^{1/2}}{\bar{a}} \quad \zeta_b = \frac{(\Delta b^2)^{1/2}}{\bar{b}}$$

Кривые 1,2,3,4 вычислены для  $\bar{a} = 9, 12, 16$  и  $24$  мк соответственно, при значениях  $\zeta_a = 39\%$ ,  $\zeta_b = 38\%$ , а кривая 5 вычислена для случая  $\zeta_a = 200\%$ ;  $\zeta_b = 50\%$  и  $\bar{a} = 24$  мк.

Из приведенных кривых следует, что изменения  $\zeta_a$  и  $\zeta_b$  достаточно сильно влияют на результаты расчета.

Экспериментально измеренное значение  $\bar{a} = (16 \pm 4)$  мк.

Мы видим, что как раз для этой области толщин имеется лучшее согласие теории с экспериментом, по крайней мере, для жесткой части спектра.

Отсюда можно заключить, что в целом теоретические и экспериментальные результаты находятся в удовлетворительном согласии.

На рис.3 приведены экспериментальные спектры для пенопласта с  $\rho = 0,04$  г/см<sup>3</sup> толщиной 2 см при разных энергиях электронов. Здесь же пунктирными кривыми приведены теоретические спектры, вычисленные для  $\bar{a} = 14$  мк,  $b = 410$  мк,  $\zeta_a = 50\%$ ,  $\zeta_b = 50\%$ .

Мы видим, что опять наблюдается неплохое согласие между теорией и экспериментом, хотя в мягкой области теория дает некоторое превышение. Это превышение по-видимому вызвано неопределенностью распределения  $\alpha$ .

На рис.4 приведены спектры для разных плотностей пенопласта толщиной  $\ell = 1$  см, измеренные при одной и той же энергии электронов  $E_e = 3,0$  Гэв.

Пунктирами приведены теоретические спектры при  $\bar{\alpha} = 14$  мк,  $\zeta_a = 50\%$ ,  $\zeta_b = 50\%$ , а  $\bar{b} = 180$  мк и  $\bar{b} = 600$  мк соответственно для  $\rho = 0,09$  и  $0,025$  г/см<sup>3</sup>.

Как следует из рисунка, мы имеем также удовлетворительное согласие между теорией и экспериментом, и опять в мягкой части спектра согласие несколько хуже.

Таким образом, мы можем заключить, что теория РПИ в нерегулярных средах удовлетворительно описывает экспериментальные результаты для пористых сред.

Представляют интерес результаты исследования особенностей РПИ в толстых радиаторах.

На рис.5 приведены спектральные распределения РПИ на выходе пенопласта толщиной 5 см при разных энергиях электронов в области частот фотонов (5 + 25) кэв.

На рис.6 приведена зависимость среднего числа фотонов от энергии электрона на выходе радиаторов 5 см и 2 см. Мы видим, что, во-первых, увеличение толщины в 2,5 раза привело к увеличению числа фотонов примерно в 1,7 раза, причем для фотонов с большей энергией эта разница несколько больше.

По-видимому, это связано с тем, что при  $E_e = 3,0$  Гэв спектр излучения становится более жестким и с увеличением толщины радиатора эффект поглощения фотонов меньше сказывается.

Интересно сравнить особенности РПИ в пористых и слоистых средах. Были измерены спектры излучения радиатора из органических пленок (рис.7).

Радиатор имел следующие параметры: толщина пленок = 20 мк, расстояние между пленками  $b = 500$  мк,  $\rho = 1,18$  г/см<sup>3</sup> и количество пленок  $m = 64$ .

Измерения проводились в области частот  $\hbar\omega = (25 \div 100)$  кэв.

На рис.8 приведена зависимость среднего числа излученных квантов в указанном интервале частот от энергии электронов.

Сравнивая данные рис.8 и рис.6, мы видим, что хотя в случае пенопластовой мишени мы имеем более мягкие кванты, но ослабление зависимости числа фотонов от  $E_e$  наступает позже, чем в случае слоистой среды.

Расчеты показывают, что насыщение в случае слоистой среды наступает из-за того, что уже при  $E \approx 2,0$  Гэв зона формирования излучения в среде становится сравнимой с толщиной плёнок.

В случае же пенопласта из-за большого разброса толщин перегородок всегда имеются стенки с толщиной  $a > \bar{x}_{cp}$ , на которых эффективно образуется РПИ.

С точки зрения детектирования частиц имеет смысл рассмотреть, как зависит эффективность регистрации электронов от энергии электронов и толщины радиатора

На рис.9 приведена зависимость эффективности регистрации электронов от энергии в нашей установке, когда была включена пропорциональная камера с пенопластовым радиатором толщиной 5 см. Мы видим, что для  $E_e = 3,0$  эффективность регистрации достигает величины  $\sim 32\%$ , хотя из-за неполного поглощения фотонов РПИ в пропорциональной камере мы имеем большие потери.

На рис.10 приведены результаты измерения эффективности регистрации при разных длинах пенопласта  $l$ , как с помощью  $NaI$ , так и пропорциональной камерой.

Из рисунка следует, что в случае пропорциональной камеры эффективность значительно больше, чем в случае  $NaI$ , и при  $l = 25$  см составляет  $\sim 56\%$ , хотя известно, что  $NaI$  поглощает с эффективностью  $\sim 100\%$  все фотоны.

Однако из-за шумовых эффектов последний детектор плохо регистрирует фотоны с  $\hbar\omega < 10$  кэв, поэтому имеет место занижение эффективности регистрации электронов по РПИ.

Расчеты показывают, что если пропорциональную камеру наполнить смесью 90% Хе + 10% СН<sub>4</sub> при атмосферном давлении, то эффективность регистрации электрона с энергией 3,0 Гэв можно поднять до 85%, используя

пенопластовый радиатор толщиной 25 см и плотностью  $\rho = 0,04 \text{ г/см}^3$ .

В заключение авторы благодарят А.Ц.Аматуни за постоянное внимание к работе, Г.М.Гарибяна и его сотрудников за полезные обсуждения, К.К.Шихлярова за помощь в измерениях.

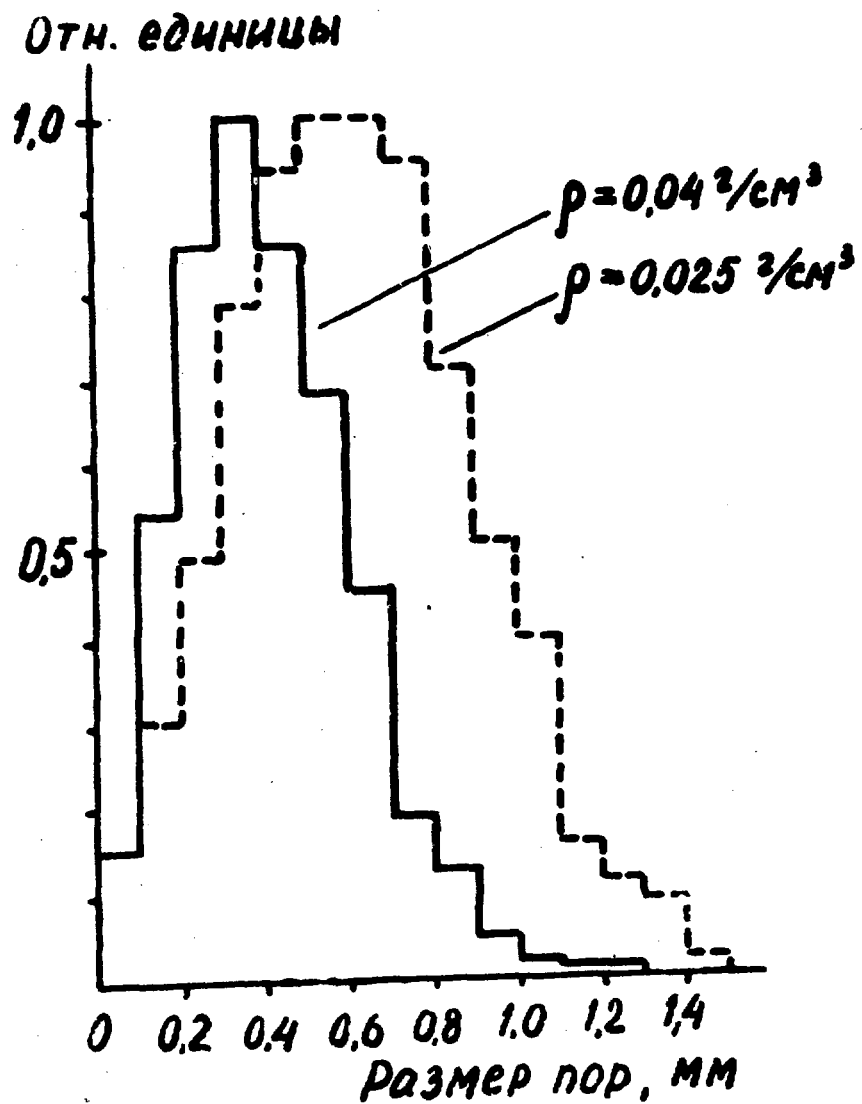


Рис. 1 Распределение размеров пор по пути частицы в пенспласте с плотностью  $\rho = 0,04 \text{ г/см}^3$  (сплошная линия) и  $\rho = 0,025 \text{ г/см}^3$  (пунктирная линия).

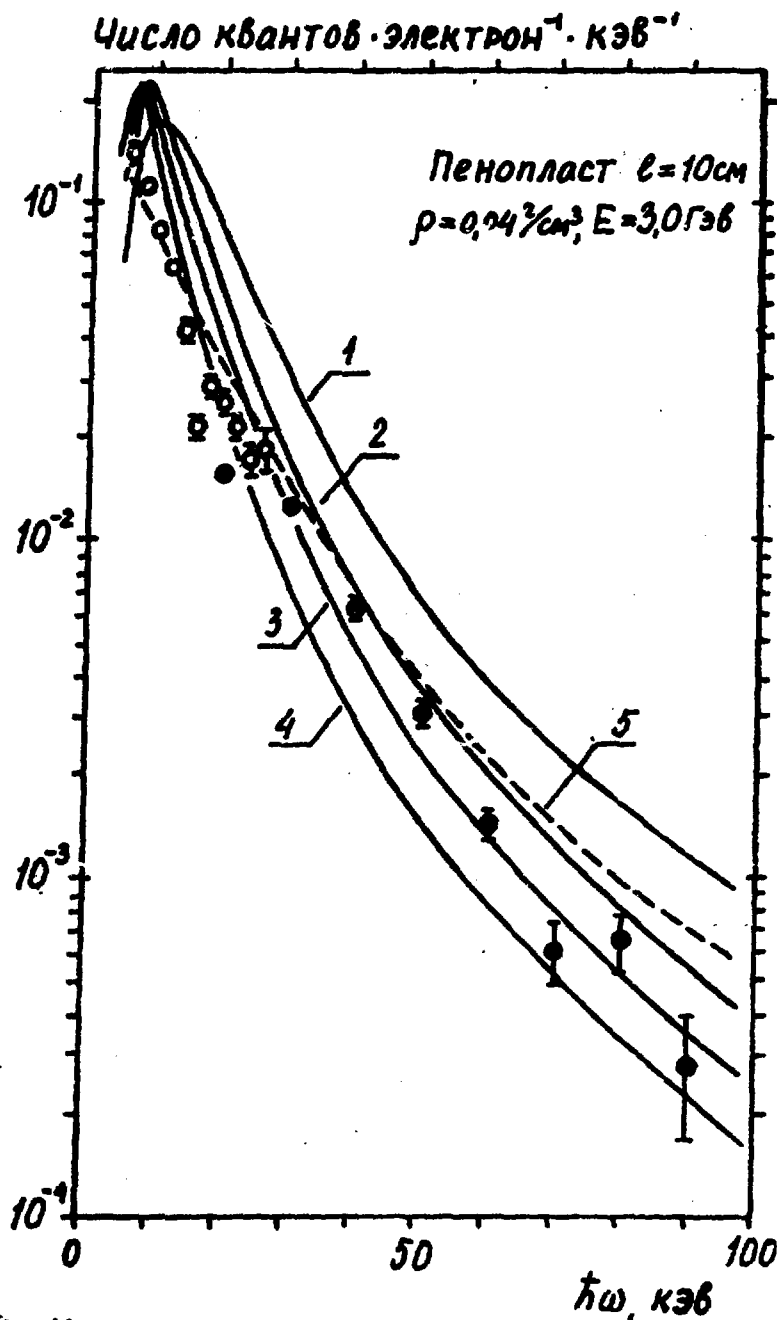


Рис.2 Частотный спектр  $P_{II}$ , образованный в пенопласте с плотностью  $0,04\text{ г/см}^3$  и толщиной  $10\text{ см}$  электронами с энергией  $3,0\text{ Гэв}$ .

Кривые 1,2,3,4 - теория для  $\bar{b} = 410\text{ микрон}$ ,  $\zeta_b \approx 40\%$ ,  $\bar{a} = 24,16,12\text{ и }9\text{ микрон}$  соответственно,  $\zeta_a \approx 40\%$ . Кривая 5 - теория для  $\bar{b} = 410\text{ микрон}$ ,  $\zeta_b = 50\%$ ,  $\bar{a} = 24\text{ микрона}$ ,  $\zeta_a = 200\%$ .

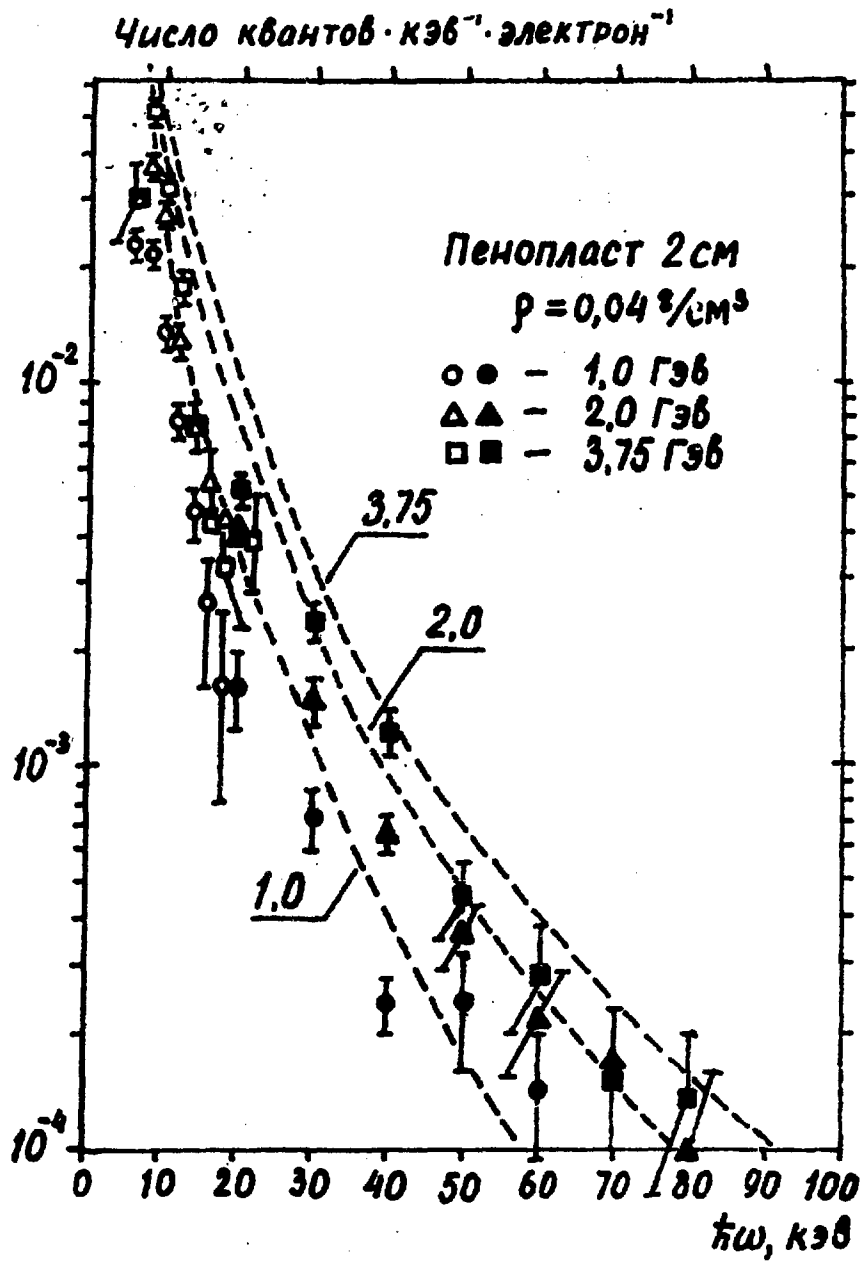


Рис.3 Спектральные распределения РПИ, образованные в пенопласте толщиной 2 см и  $\rho = 0,04 \text{ г/см}^3$  при различных энергиях электрона. Пунктирные кривые - теория для  $b = 410$  микрон,  $\zeta_b = 50\%$ ,  $\tilde{a} = 14$  микрон,  $\zeta_a = 50\%$ .

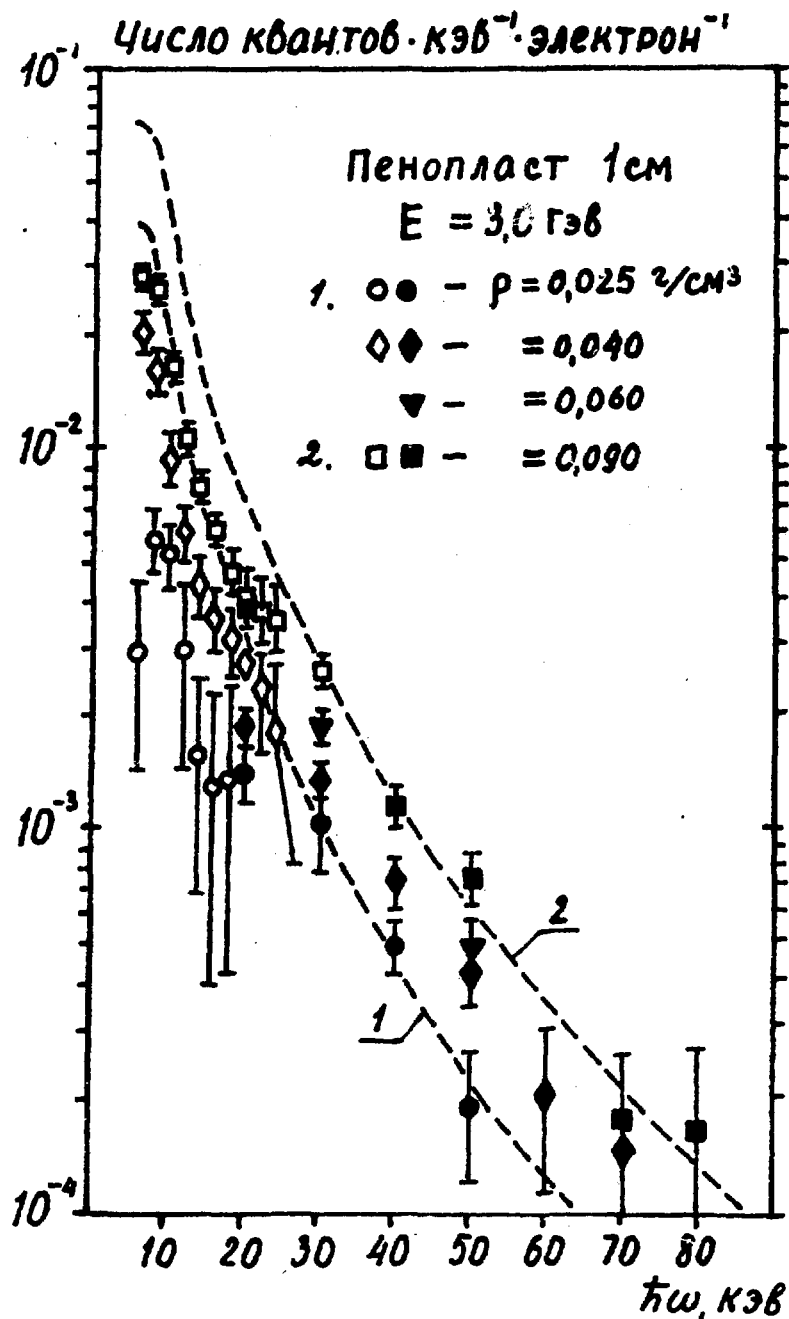


Рис.4 Спектры переходного излучения, образованного электронами с  $E=3,0$  Гэв в пенопласте различной плотности. Кривая 1-теория для  $\bar{b} = 600$  микрон,  $\bar{a} = 14$  микрон,  $\zeta_a = \zeta_b = 50\%$ ; кривая 2 - теория для  $\bar{b} = 180$  микрон,  $\bar{a} = 14$  микрон,  $\zeta_a = \zeta_b = 50\%$ .

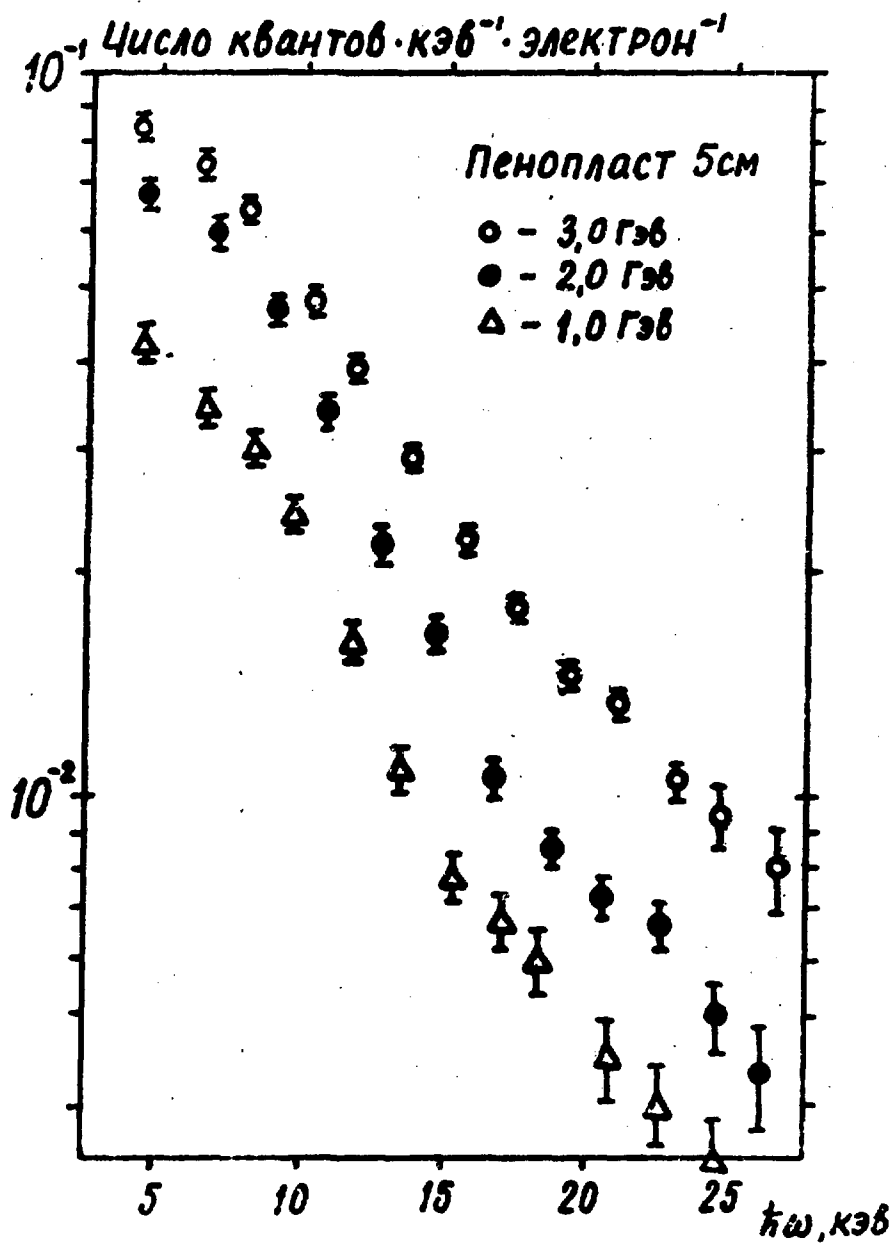


Рис.5 Спектральные распределения РИИ в пенопласте толщиной 5 см при различных энергиях электронов.

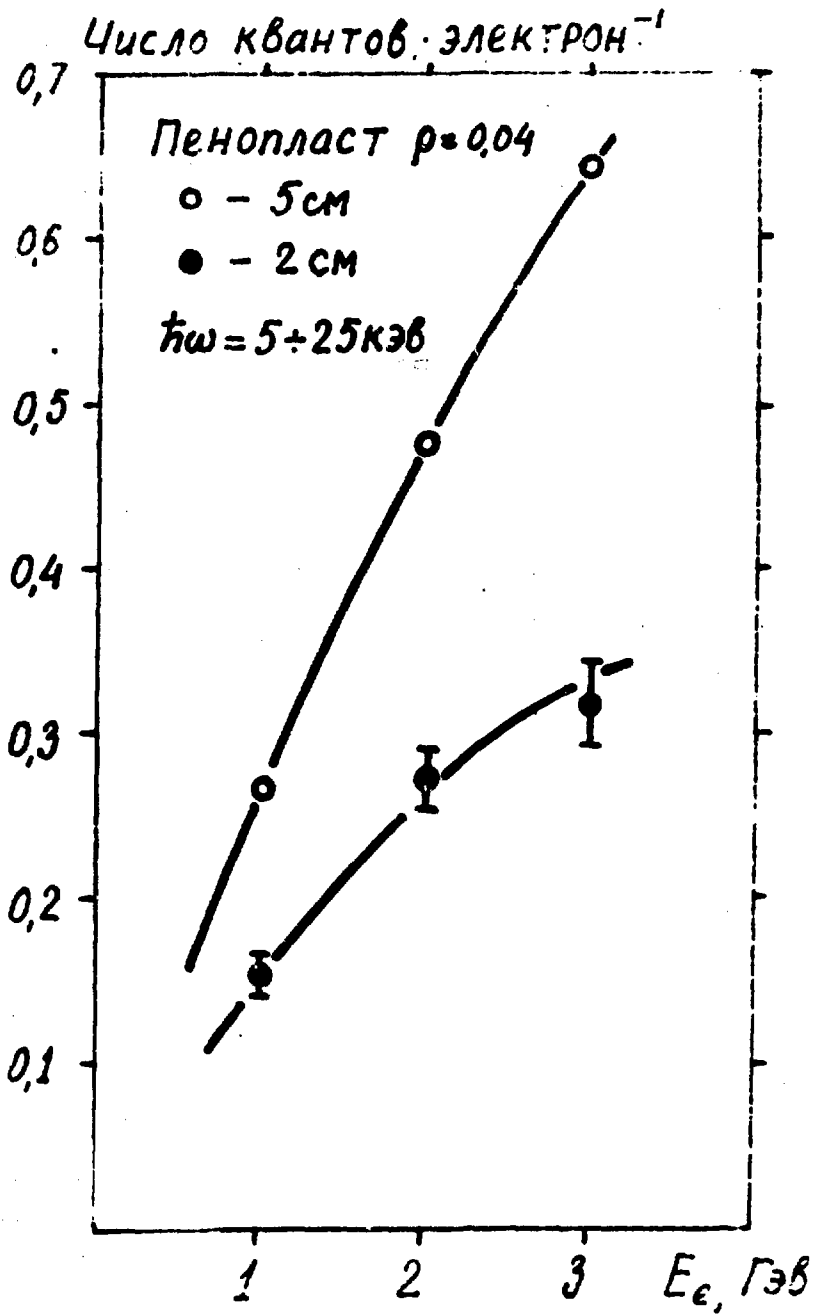


Рис.6 Зависимость среднего числа квантов на выходе пенопластовых радиаторов 5 см и 2 см от энергии электрона.

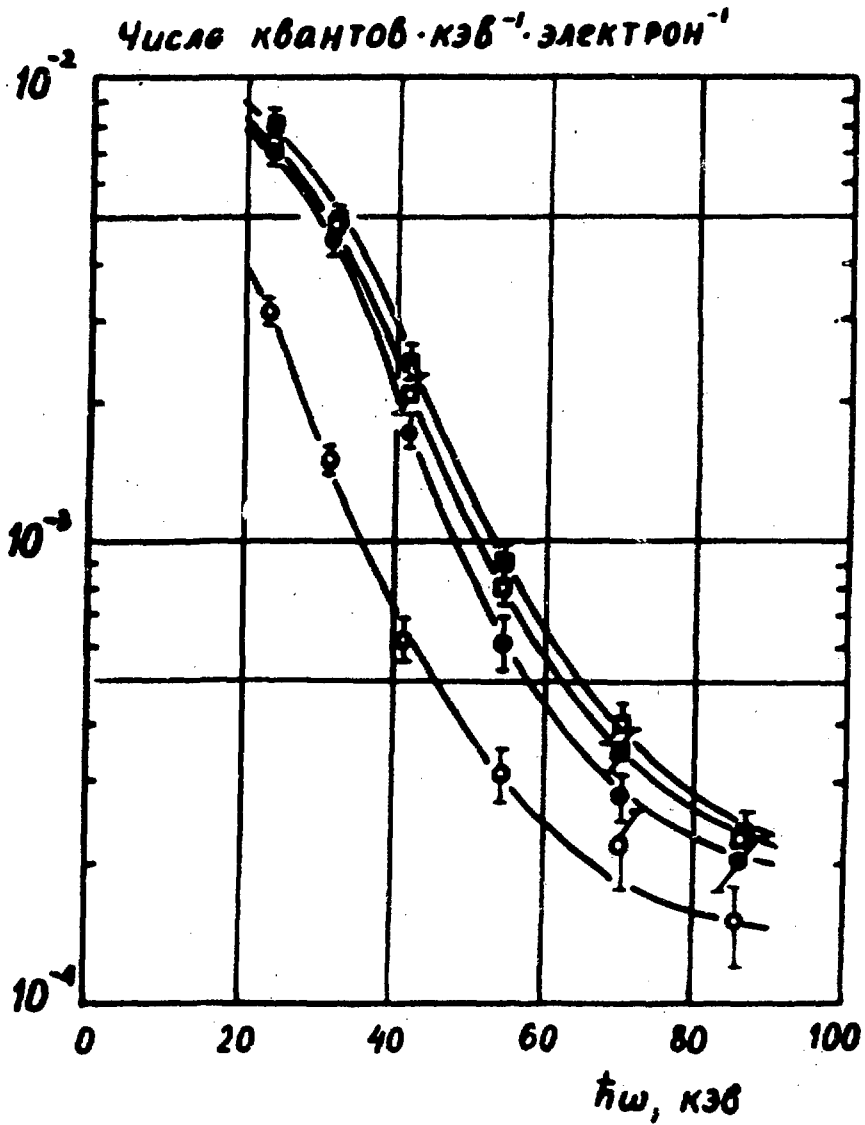


Рис.7 Спектры РПИ на выходе стопки из органической пленки  $a = 20$  микрон,  $b = 500$  микрон,  $n = 64$ . Энергия электрона  $1,0 \pm 3,75$  Гэв.

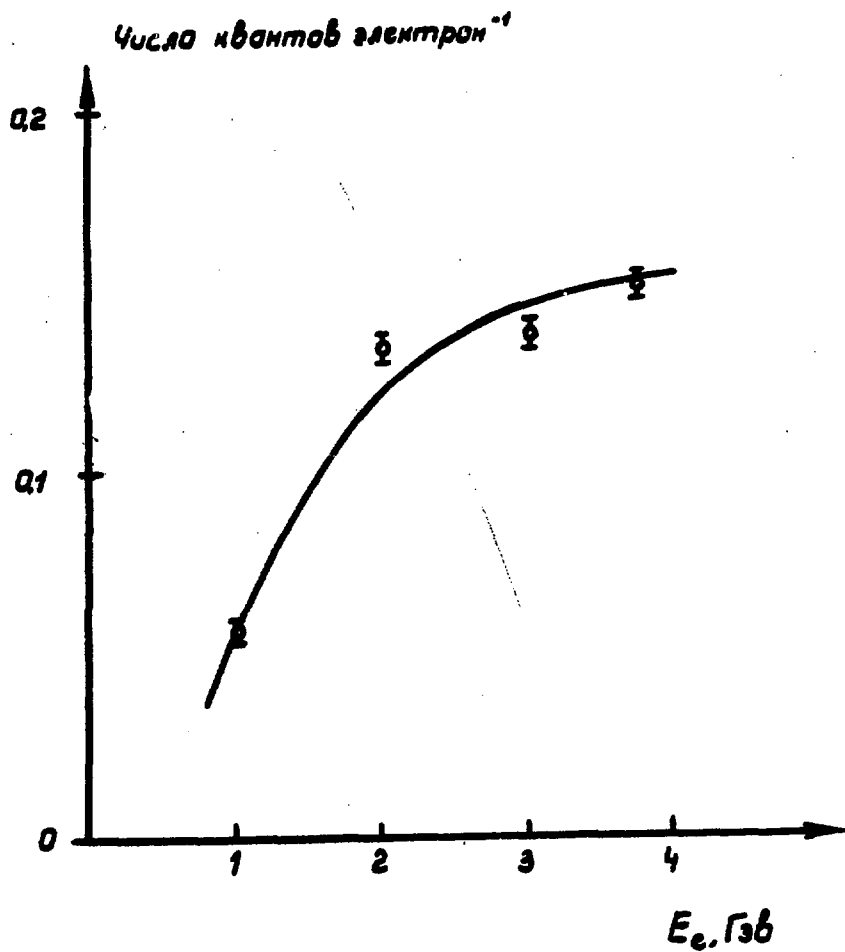


Рис. 8. Зависимость среднего числа излученных квантов в стопке из 64 органических пленок от энергии электрона, в интервале частот  $\hbar\omega = 25 \div 100$  кэв.

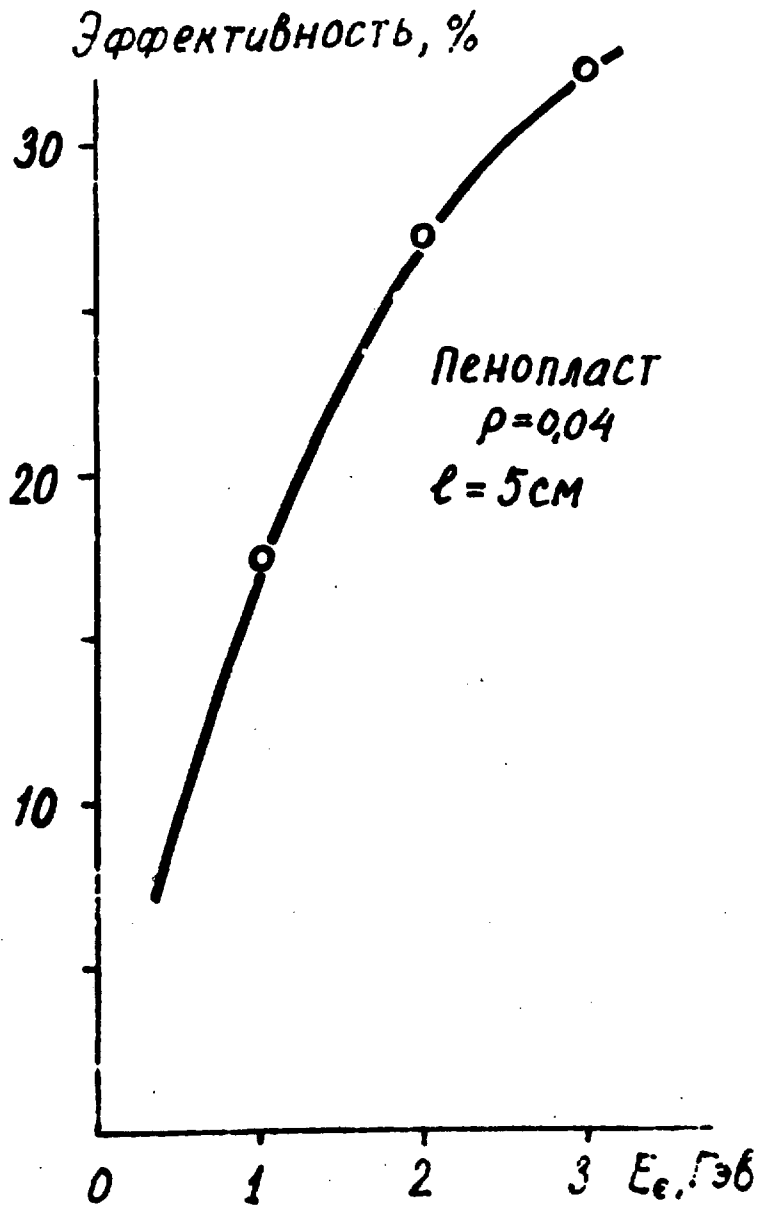


Рис.9. Зависимость эффективности регистрации электронов различных энергий по переходному излучению пропорциональным счетчикам толщиной 30 см при наполнении 90%  $A$  + 10%  $CH_4$ .

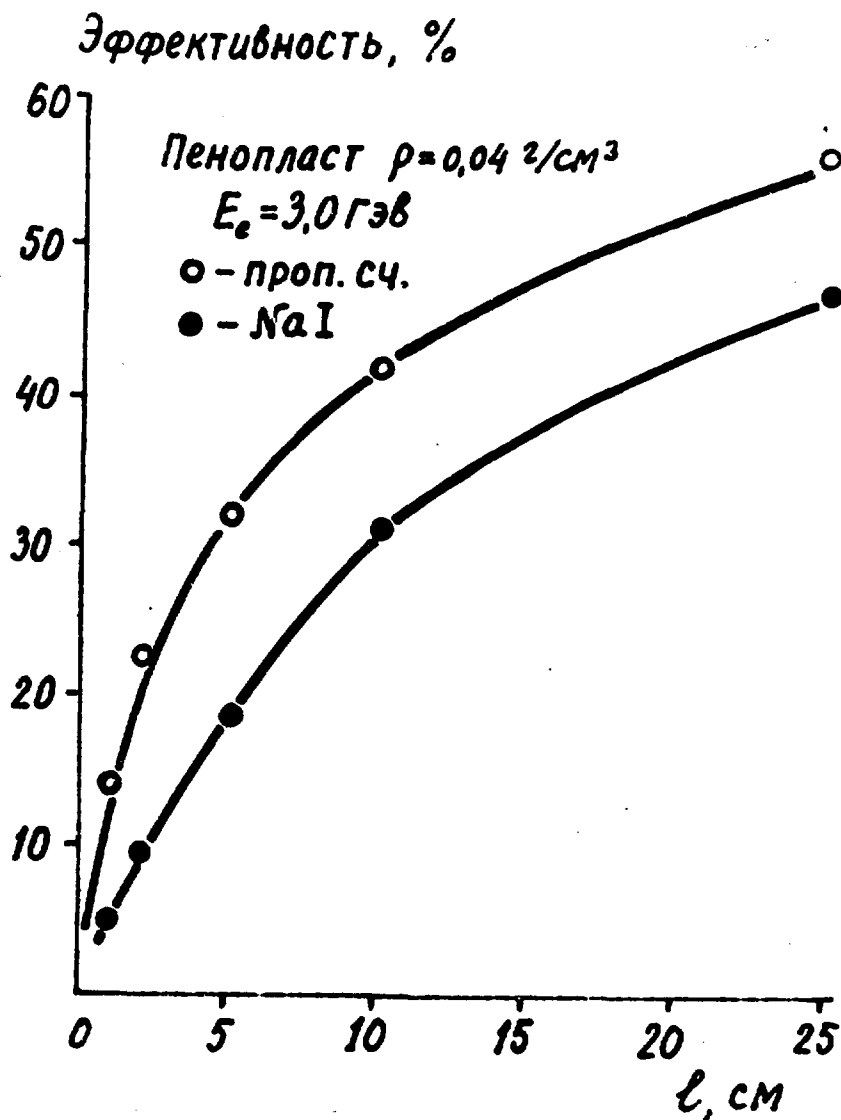


Рис.10. Эффективность регистрации электронов по переходному излучению для пропорционального и сцинтилляционного счетчика при разных толщинах радиатора - пенопласта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. К.А.Авакян, А.И.Алиханян, Г.М.Гарибян, М.П.Лорикян, К.К.Шихляров. Изв.Ан Арм.ССР, Физика, 5, 267 (1970).
2. А.И.Алиханян, Г.М.Гарибян, М.П.Лорикян, К.К.Шихляров. Труды международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий, 2, 542, Дубна (1970).
3. А.И.Алиханян, Э.С.Беляков, Г.М.Гарибян, М.П.Лорикян, К.Ж.Маркарян, К.К.Шихляров. Письма в ЖЭТФ, 16, 315 (1972).
4. А.И.Алиханян, Э.С.Беляков, М.П.Лорикян, К.Ж.Маркарян, К.К.Шихляров. ЖЭТФ, 65, 1330 (1973)
5. Г.М.Гарибян, Л.А.Геворкян, Ян Ши. ЖЭТФ, 66, 552 (1974).
6. Г.М.Гарибян. ЖЭТФ, 38, 1814 (1960)
7. М.П.Лорикян, К.К.Шихляров, В.Я.Яралов. Научное сообщение ЕФИ-31(73).

Рукопись поступила 25-го апреля 1973г.

Редактор Л.П.Мукаян

Тех.редактор А.С.Абрамян

Заказ 309

Вф- 03418

Тираж 299

---

Подписано к печати 5/IX-75г. Формат издания 30x40  
1,5 уч.изд.л. Ц.10 к.

---

Отпечатано на ротапринте  
Ереванского физического института, Ереван-36, пер.Маркаряна 2

