

ВАСИЛЕВСКИЙ И.М. нар. Б1-2749

В-19

+

Б1-2749.

*Васильев, В.И.*

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
Лаборатория ядерных проблем

B-19

И.М.Василевский, В.И.Комаров, О.В.Савченко

*Б1-2749*

ФОРМИРОВАНИЕ ПУЧКА ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 100 + 200 МЭВ  
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОТОНОВ В ЛУЧЕ-  
ВОЙ ТЕРАПИИ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ БОЛЬНЫХ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ  
РЕЗУЛЬТАТЫ ДОЗИМЕТРИИ

Рукопись поступила  
в издательский отдел  
.. 17. ... 1966.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
БИБЛИОТЕКА

г.Дубна, 1966 г.

## А Н Н О Т А Ц И Я

В работе описывается способ формирования протонных пучков с энергиями от 100 до 200 Мэв, получаемых путем торможения выведенного из ускорителя пучка протонов с энергией 670 Мэв в полиэтиленовом замедлителе толщиной 150±160 г/см<sup>2</sup>.

Полученная величина интенсивности заторможенного пучка протонов с энергией 135 Мэв, равная  $(2 + 3) 10^6$  протонов/сек. • см<sup>2</sup>, сравнивается с расчетным значением интенсивности, учитывающим ядерное взаимодействие и многократное кулоновское рассеяние протонов в полиэтиленовом замедлителе в процессе торможения. Предварительные результаты дозиметрии протонных пучков определяют скорость накопления дозы в Брэгговском пике равную 20±30 рад/мин для энергии заторможенных протонов 135 Мэв.

Еще в 1946 году Вильсоном <sup>/1/</sup> было впервые указано на возможность применения тяжелых заряженных частиц высокой энергии для облучения глубоко расположенных опухолей и было отмечено, что такие пучки обладают целым рядом особенностей, выгодно отличающих их от рентгеновских лучей и электронов. Эти особенности пучков тяжелых заряженных частиц, таких как протоны, дейтроны,  $\alpha$  - частицы и др., могут быть кратко суммированы следующим образом:

1) Такие пучки гораздо слабее рассеиваются в тканях по мере проникновения в глубь тела.

2) Они имеют хорошо определенный пробег, позволяющий эффективно сосредоточить дозу облучения в заданной области тела.

3) Линейная передача энергии таких пучков возрастает с глубиной проникновения, образуя на конце пробега так называемый "пик Брэгга", что особенно важно в тех задачах лучевой терапии, когда желательно подвергнуть лечению или подавлению малый объем ткани с минимальными радиационными повреждениями окружающих клеточных структур.

4) Уменьшение энергии частиц в конце их пробега увеличивает относительную биологическую эффективность излучения и тем самым создает возможность еще большей локализации облучения в объеме ткани, подвергнутой лечению или подавлению.

Тобиас, Ангер и Лауренс <sup>/2/</sup> первыми в 1952 году использовали пучки тяжелых заряженных частиц от синхроциклотрона в Беркли для радиобиологических исследований. Подобные работы начали проводиться в Швеции с 1956 года Б.Ларсоном и др. <sup>/3/</sup>, использовав-

шими в своих исследованиях протонный пучок с энергией 185 Мэв от ускорителя в Упсала. Кильберг и др.<sup>/4/</sup> в Гарвадском университете на протонном пучке с энергией 160 Мэв в 1959 году провели предварительные терапевтические исследования на животных и распространили их затем на людей, подвергнув лечению таким методом в общей сложности 155 пациентов.

В связи с тем, что в Советском Союзе в настоящее время нет протонного ускорителя с энергией около 200 Мэв в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в конце 1965 года были проведены предварительные эксперименты по выяснению возможности получения протонных пучков с энергией от 100 до 200 Мэв с целью использования таких протонных пучков для проведения медико-биологических исследований и лучевой терапии онкологических больных.

Общая схема формирования протонных пучков и расположения регистрирующей аппаратуры изображена на рис. I. Введенный из вакуумной камеры ускорителя протонный пучок с энергией 670 Мэв, энергетической дисперсией  $\sigma_E = 2,8$  Мэв <sup>/5/</sup> и полной интенсивностью около  $3 \cdot 10^{11}$  протонов/сек <sup>/6/</sup> фокусировался магнитными квадрупольными линзами на полиэтиленовый замедлитель толщиной  $\sim 160$  г/см<sup>2</sup>. Заторможенные протоны отклонялись магнитом в коллиматор, расположенный в защитной стене под углом 30° к направлению первичных протонов, очищаясь при этом от примесей других частиц. На выходе коллиматора располагалась регистрирующая аппаратура, позволявшая измерять интенсивность заторможенного пучка и проводить его дозиметрию. В некоторых экспериментах весь путь заторможенных протонов от замедлителя до регистрирующей аппаратуры проходил в вакуумном канале, который включал в себя как сос-

тавную часть и сам коллиматор. Набором отдельных секций коллиматора можно было менять диаметр протонных пучков от 20 до 100 мм или с помощью щелевых коллиматоров придавать поперечному сечению пучка форму прямоугольника. Интенсивность заторможенного пучка протонов определялась путем измерения тока от плоскопараллельной ионизационной камеры, наполненной аргоном до давления 1,2 атм, или путем непосредственной регистрации отдельных протонов телескопом из трех сцинтилляционных счетчиков при сниженной интенсивности протонного пучка. Абсолютная интенсивность потока протонов с энергией около 135 Мэв, определенная этими двумя методами для коллиматора диаметром 20 мм, получилась равной  $(6+9) \cdot 10^6$  протонов/сек или  $(2+3) \cdot 10^6$  протонов/сек.см<sup>2</sup>. При увеличении диаметра коллиматора интенсивность потока протонов возрастала приблизительно пропорционально площади выходного отверстия коллиматора, вплоть до диаметра коллиматора 50 мм. Для энергии протонов 108 Мэв интенсивность пучка была примерно в 1,5 раза меньше, а при энергии 180 Мэв в 2 раза больше, чем интенсивность протонного пучка с энергией 135 Мэв. При варьировании энергии заторможенного пучка протонов толщина полиэтиленового замедлителя устанавливалась каждый раз соответственно необходимому сбросу энергии первичного пучка, чтобы получить точно заданную энергию заторможенного пучка. Средняя энергия и дисперсия заторможенного пучка протонов определялись по кривой Брэгга, измеренной в полиэтиленовом фильтре с помощью ионизационной камеры, а также путем измерения пробега протонов в полиэтиленовом фильтре, установленном в телескопе из трех сцинтилляционных счетчиков.

Некоторые из полученных таким способом кривых Брэгга и кривая пробега, измеренная телескопом показаны на рис.2. Для энергии протонов 108 Мэв измерения дисперсии по кривой Брэгга и кривой пробега дали совпадающие результаты  $\sigma_E = 9$  Мэв. При наличии вакуума дисперсия пучка уменьшается до значения  $\sigma_E = 7,2$  Мэв, а интенсивность возрастает примерно на 30%. При энергии протонов 135 Мэв энергетическая дисперсия пучка равнялась  $\sigma_E = 10$  Мэв.

Полученная интенсивность заторможенного пучка протонов с энергией 135 Мэв обеспечивала накопление дозы в максимуме кривой Брэгга со скоростью равной приблизительно 20-30 рад/мин. При этом суммарная доза рассеянного излучения в точках 1,2,3,4 и 5 рис.1., замеренная М.М.Комочковым при работе ускорителя в режиме выведенного протонного пучка, составляла соответственно 18,24, 24,30 и 40 рэбэр/час, что примерно в  $10^5$  раз меньше мощности дозы в максимуме кривой Брэгга.

Измеренное значение интенсивности заторможенного пучка протонов хорошо согласуется с расчетным значением интенсивности, при вычислении которой учитывалось взаимодействие первичных протонов с ядрами полиэтиленового замедлителя, а также многократное кулоновское рассеяние протонов в процессе их торможения. Действительно, в области энергии протонов от 130 Мэв до 660 Мэв полное сечение взаимодействия протонов с ядрами углерода можно считать постоянным и равным  $(340 \pm 10) \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$  /7/, а сечение взаимодействия протонов с ядрами водорода можно положить в этом интервале энергии равным  $30 \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$  /8/. Тогда полное сечение взаимодействия протонов с полиэтиленом, принимая для него химическую формулу  $(\text{CH}_2)_n$ , составит  $\sigma_{\text{тсн}_2} = 400 \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$ , и ослабление потока протонов в замедлителе толщиной  $\approx 160 \text{ г/см}^2$  будет равно

$\exp(-n\sigma_{\text{т.сн}_2}) \approx 1/15 \approx 0,065$ , где  $n$  - число условных молекул  $\text{CH}_2$  приходящихся на  $1 \text{ см}^2$  площади замедлителя по направлению распространения пучка.

Угол многократного рассеяния протонов в замедлителе можно оценить следующим образом. Для протонов с импульсом  $P$  и достаточно тонкого рассеивателя угол многократного рассеивания определяется следующим выражением [9].

$$\langle \theta^2 \rangle = \frac{0,157 \cdot z \cdot (z+1) \cdot t \cdot \ln[1,13 \cdot 10^4 \cdot z^{\frac{2}{3}} \cdot A^{-1} \cdot t \beta^{-2}]}{A \cdot (pv)^2} \quad (1)$$

В области энергии протонов  $100 \div 700$  Мэв зависимость  $(pv)$  в Мэв от остаточного пробега  $R$  в  $\text{г/см}^2$   $\text{CH}_2$  можно аппроксимировать с точностью несколько процентов функцией вида:  $(pv)^2 = 4310 R^{1,08}$ . Полагая в энергетическом интервале  $100 \div 700$  Мэв логарифмическую функцию в выражении (1) постоянной и равной 15, можно получить следующую оценку угла многократного кулоновского рассеяния с учетом изменения энергии протонов в процессе замедления

$$\langle \theta^2 \rangle = 1,8 \cdot 10^{-3} \int_{R(P_{\text{кон}})}^{R(P_{\text{нач}})} \frac{dR}{R^{1,08}} = 1,8 \cdot 10^{-3} \int_{13}^{72} \frac{dR}{R^{1,08}} = 3,6 \cdot 10^{-3} (\text{радчан})^2 \quad (2)$$

Считая, что рассеянные протоны на выходе замедлителя распределены по закону

$$dn = \frac{2}{\langle \theta^2 \rangle} e^{-\frac{\theta^2}{\langle \theta^2 \rangle}} \theta d\theta \cdot N_0 e^{-n\sigma_{\text{т.сн}_2}},$$

можно получить следующее выражение для интенсивности потока заторможенных протонов на выходном отверстии коллиматора



$$n = N_0 e^{-n\sigma_{тсмк}} \cdot \int_0^{\theta_0} \frac{2}{\langle \theta^2 \rangle} \cdot e^{-\frac{\theta^2}{\langle \theta^2 \rangle}} \theta d\theta = N_0 e^{-n\sigma_{тсмк}} \cdot (1 - e^{-\frac{\theta_0^2}{\langle \theta^2 \rangle}})$$

$$\text{или } n = N_0 e^{-n\sigma_{тсмк}} \cdot \frac{\theta_0^2}{\langle \theta^2 \rangle}, \text{ если } \frac{\theta_0^2}{\langle \theta^2 \rangle} \ll 1,$$

где  $\theta_0 = \frac{r}{L}$  угол, под которым виден радиус коллиматора  $r$  на расстоянии  $L$  от замедлителя. Для типичных значений  $r = 1$  см,  $L = 8$  метров и  $N_0 = 3 \cdot 10^{11}$  протонов/сек

$$n = 3 \cdot 10^{11} \cdot 0,065 \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-6}}{3,6 \cdot 10^{-3}} = 8,5 \cdot 10^6 \text{ протонов/сек}$$

или  $n_0 = 2,7 \cdot 10^6$  протонов/см<sup>2</sup> сек, что хорошо совпадает с измеренным значением  $2 \cdot 3 \cdot 10^6$  протонов/см<sup>2</sup> сек для заторможенных протонов с энергией 135 Мэв.

Полную картину распределения поглощенной дозы в фантоме гомогенного типа можно получить, если измерение кривой Брэгга дополнить измерениями радиальной зависимости распределения дозы.

В одном из проведенных экспериментов это достигалось с помощью дистанционно управляемого одиночного сцинтилляционного счетчика с размером сцинтиллятора  $6 \times 6 \times 6$  мм<sup>3</sup>, - передвигающегося перпендикулярно протонному пучку. Выходной ток с фотоэлектронного умножителя такого счетчика подавался на самописец типа ЭШВ-5I, где вычерчивалась радиальная зависимость поглощенной дозы. Одна из таких зависимостей показана на рис.3в. На рис.3а показана кривая Брэгга для 135 Мэв протонов, снятая с помощью автоматически наращиваемого алюминиевого замедлителя, установлен-

ного перед плоской ионизационной камерой, ток которой после усиления записывался на ленте потенциометра ЭПМ-09.

Применение для абсолютной калибровки ионизационной камеры цилиндра Фарадея, позволит с помощью упомянутых выше методов достичь точности около 5% в определении величины поглощенной дозы в любой заданной точке фантома, что может быть достаточным в целом ряде медико-биологических исследований и клинике онкологических больных.

*Селин*

*Медведев*  
*Ковалев*

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. R.R. Wilson, *Radiology*, 47, 487, (1946)
2. C.A. Tobias, H.O. Anger, and J.H. Lawrence, *Amer. J. Roentgenol.* 67, 1, (1952)
3. B. Larsson, *The British Journal of Radiology*, 34, 143, (1961)
4. R.N. Kjelberg and W.M. Preston, *Excerpta med, Intern. Congress Series*, №36, (1961)
5. И.М.Василевский, Ю.Д.Прокошкин, *Ат. энергия*, 7, вып.3., 225, (1959)
6. В.И.Комаров, О.В.Савченко, Л.М.Сороко, препринт ОИЯИ ЛЯП-1325, (1963).
7. В.И.Москалев, Б.В.Гавриловский, *ДАН СССР*, 110, вып.6, 972 (1956).
8. В.П.Джелепов, В.И.Москалев, С.В.Медведь, *ДАН СССР*, 104, №3, 380, (1955).
9. Экспериментальная ядерная физика под редакцией Э.Сегре, т. I. 241 (1955).

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис.1. Общая схема формирования протонных пучков и расположения регистрирующей аппаратуры.

ВКУ - вакуумная камера ускорителя, ОН-отклоняющие насадки, Р- выведенный протонный пучок с энергией 670 Мэв, МКЛ-магнитная квадрупольная линза, ТФ- тормозящий фильтр из полиэтилена, ОМ - отклоняющий магнит, ВТ-вакуумный тракт для транспортировки заторможенных протонов, К - коллиматор в защитной стене, М - мониторный счетчик, Ф-фильтр из полиэтилена, ИК - ионизационная камера, ТСС-телескоп из трех сцинтилляционных счетчиков, ПСС - передвижной сцинтилляционный счетчик, ТФК - тормозящий фильтр из алюминия, состоящий из двух клиновидных частей. 1,2,3,4, 5, точки, где проводились измерения дозы рассеянного излучения.

Рис.2. а) 0 - кривая Брэгга для пучка заторможенных протонов с энергией 108 Мэв, и диаметра коллиматора 20 мм.

$\Delta$  - кривая Брэгга для такого же пучка, но снятая после откачки вакуумного канала,  $\times$  - кривая Брэгга для пучка заторможенных протонов с энергией 135 Мэв и диаметра коллиматора 30 мм, снятая до откачки вакуумного канала.

$R_{0,1,2,3}$  - средние значения пробегов протонов в полиэтиленовом фильтре.

б) Интегральная кривая пробега протонов в тормозящем полиэтиленовом фильтре, установленном в телескопе из трех сцинтилляционных счетчиков.

$R_0$  - средний пробег,  $R_{\Sigma}$  - экстраполированный пробег.

Рис.3. а) Кривая Брэгга для 135 Мэв протонов, снятая с помощью автоматически наращиваемого алюминиевого фильтра, установленного перед плоскопараллельной ионизационной камерой, ток которой записывался на ленте потенциометра ЭПП-09.

12

в) Радиальная зависимость поглощенной дозы, снятая с помощью дистанционно управляемого одиночного сцинтилляционного счетчика, передвигавшегося перпендикулярно протонному пучку. Запись тока с выхода умножителя этого счетчика сделана на ленте самописца типа ЭПВ-51.

Вертикальные калибровочные метки на этих кривых соответствуют либо определенной толщине фильтра, либо расстоянию, пройденному передвижным счетчиком.

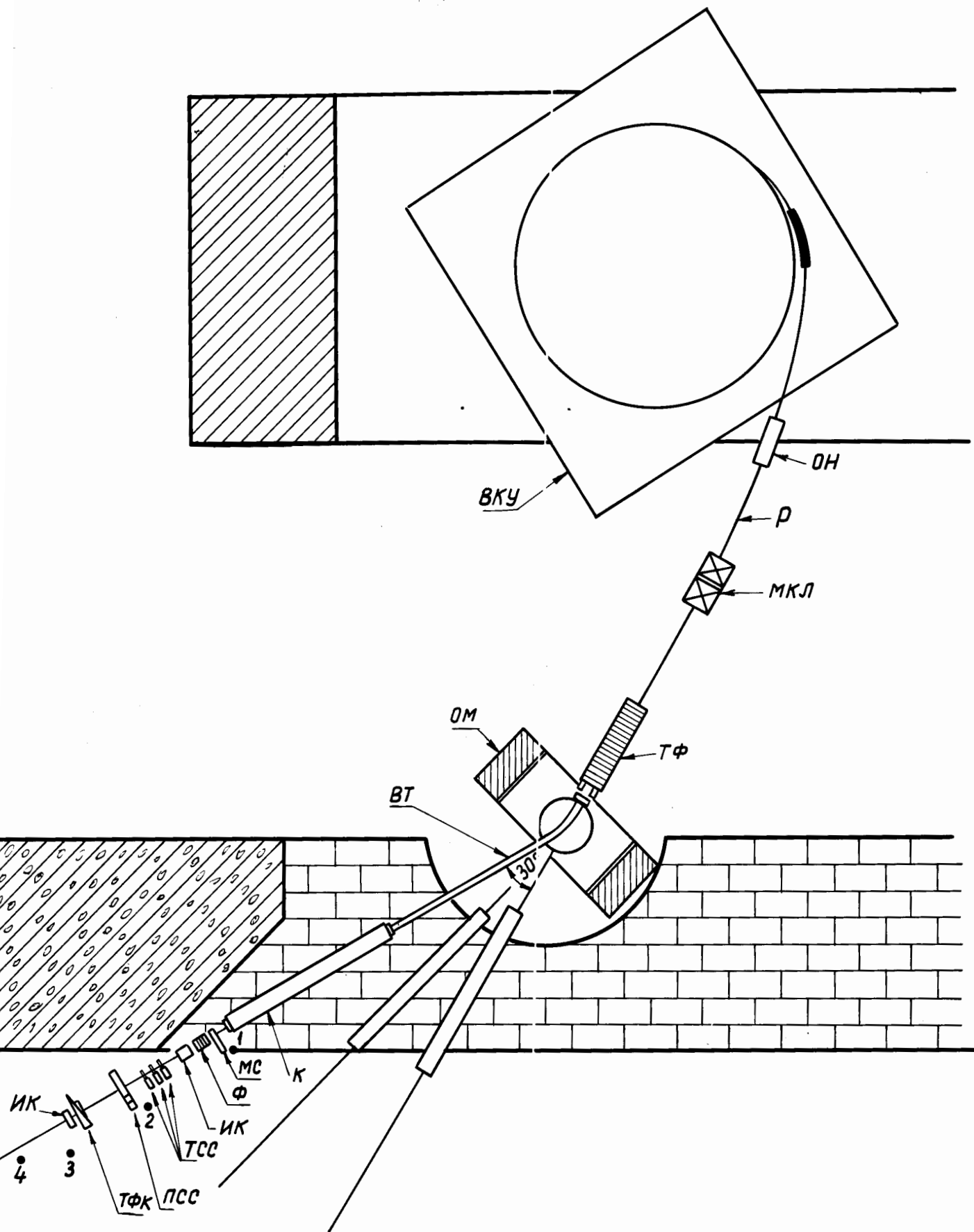


Рис.1.

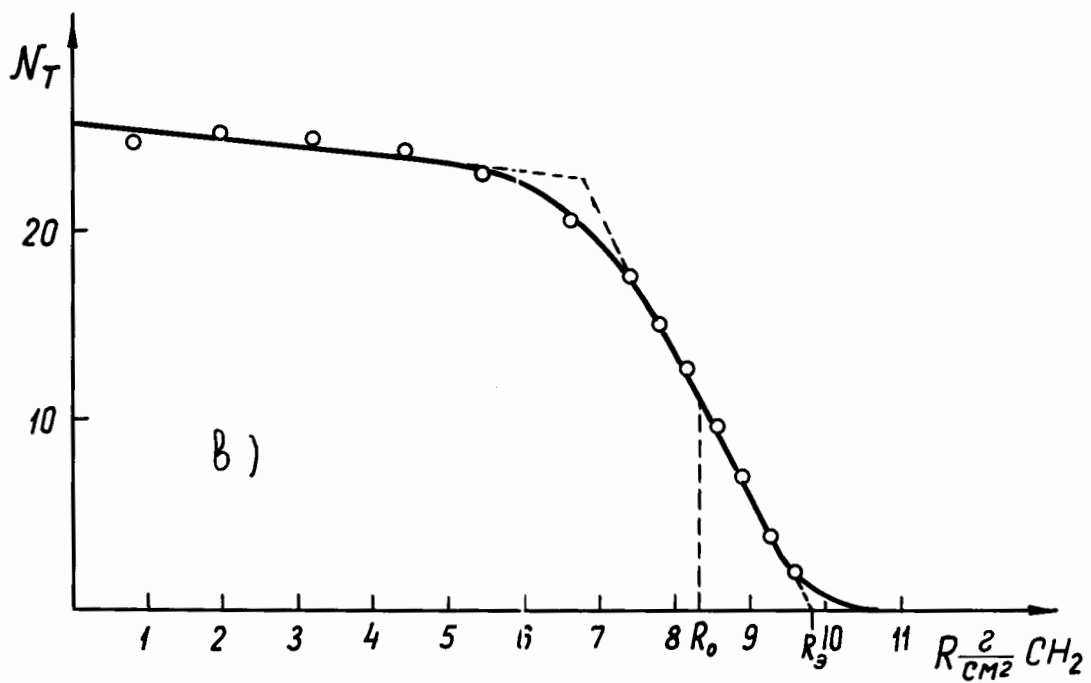
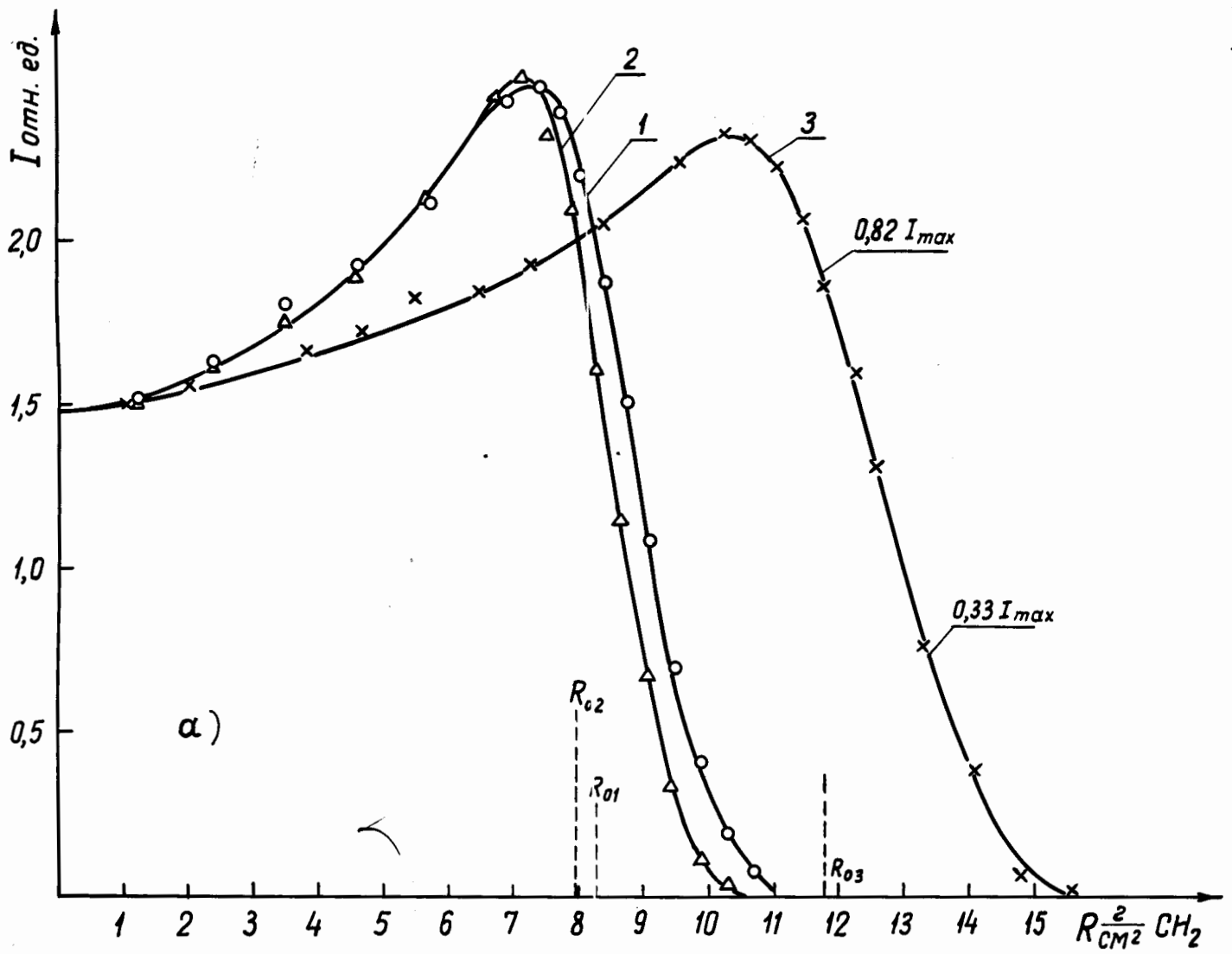


Рис. 2.

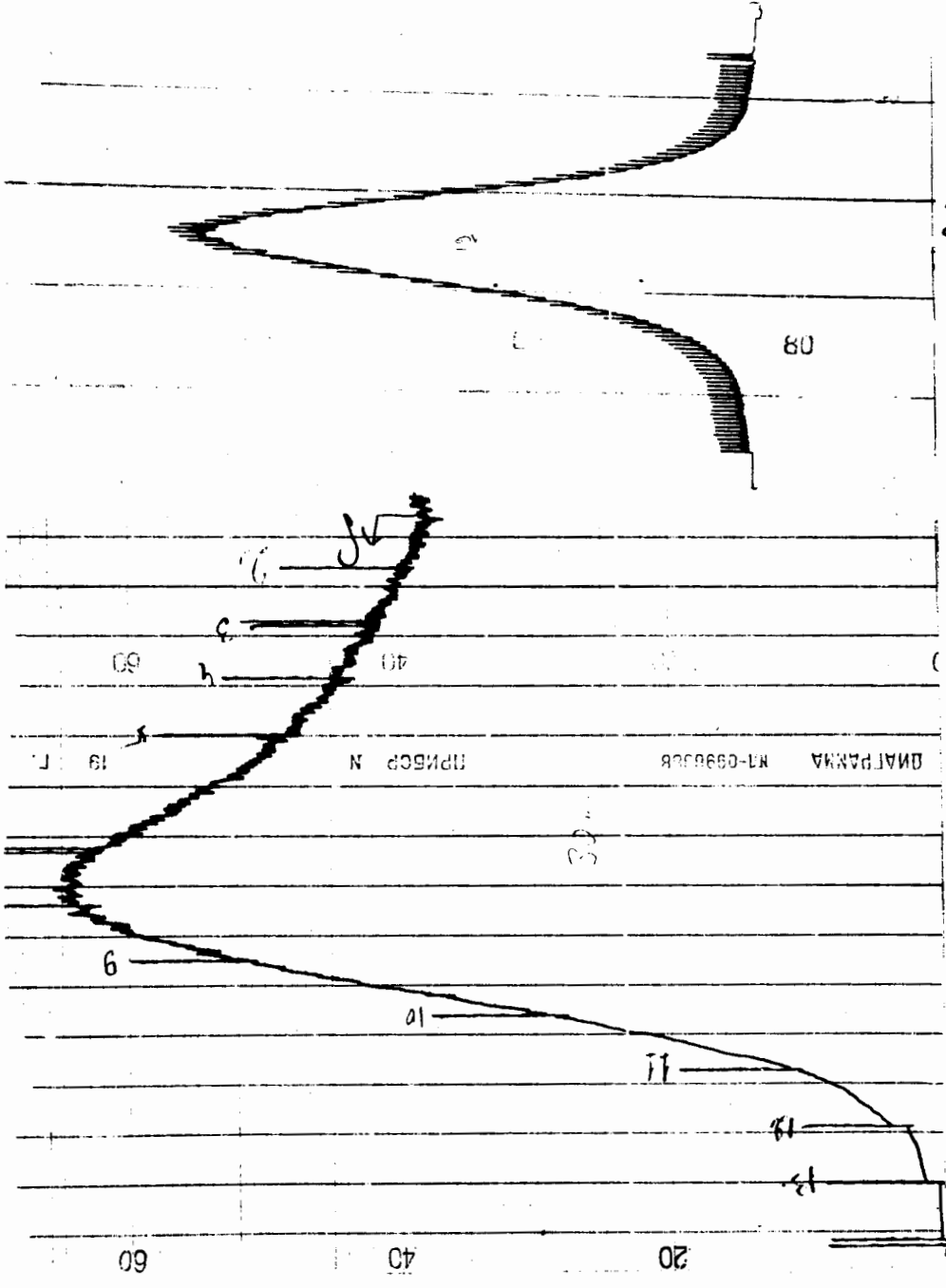


Рис. 3