

2291

Экз. чит. зала

2+

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

2291



В.Л. Михеев

МЕТОДЫ СБОРА АТОМОВ ОТДАЧИ
В ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ
С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

АБСОЛЮТНОЕ ЧИСТЫЕ РЕАКЦИИ

1965

2291

В.Л. Михеев

МЕТОДЫ СБОРА АТОМОВ ОТДАЧИ
В ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ
С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

Направлено в ПТЭ

ОИ И
БИБЛИОТКА

В в е д е н и е

При изучении продуктов ядерных реакций с тяжелыми ионами широкое применение получили методы сбора атомов отдачи^{/1,2/}. Сущность этих методов состоит в том, что при попадании бомбардирующей частицы в ядро мишени ему передается настолько большой импульс, что продукт взаимодействия может быть выбит из мишени довольно значительной толщины. Выбитые из мишени атомы собираются тем или иным способом и затем анализируются. Существуют следующие основные методы сбора атомов отдачи:

1. Прямое соби́рание, при котором атомы отдачи вбиваются в сборник из того или иного материала, куда попадает и пучок бомбардирующих частиц.
2. Соби́рание атомов отдачи путем вбивания в сборник или детектор излучения с отделением от пучка бомбардирующих ионов с помощью магнитных и электростатических полей^{/3/}.
3. Соби́рание заторможенных в газе атомов отдачи путем адсорбции на стенках замкнутого объема, в котором находится мишень^{/4/}.
4. Электростатическое соби́рание заторможенных в газе атомов, которые, как показывает опыт, какое-то время имеют электрический заряд^{/5,6/}.
5. Соби́рание заторможенных в газе атомов отдачи путем адсорбции из струи газа, образуемой при его откачке из объема с мишенью через трубопровод или небольшое отверстие^{/7,8/}.

Достоинством первого метода является простота и 100%-ная эффективность сбора выбитых из мишени атомов отдачи. К недостаткам относится то, что атомы отдачи распределяются в сборнике по глубине, равной пробегу атомов отдачи в материале сборника, который может доходить до величины порядка $\text{мг} \cdot \text{см}^{-2}$ алюминия. Это приводит к существенному ухудшению спектров α -активных и спонтанно делящихся продуктов. Существ-

венные трудности при работе на прямом выбивании создаются также высоким уровнем активации сборника пучком и его нагревом, который может привести даже к частичному распылению материала сборника.

Достоинством второго метода является возможность выбивания атомов отдачи непосредственно, например, в чувствительную область полупроводникового детектора за времена, равные времени пролета атома отдачи от мишени до детектора, возможность получить некоторые данные о массе атома отдачи. Недостатком является сложность и низкая эффективность сбора выбитых атомов отдачи.

Достоинством третьего метода является возможность получения моноатомных слоев атомов отдачи, независимость эффективности сбора от чистоты используемого газа и величины тока ионов. К недостаткам относится невозможность получить высокий коэффициент сбора на одной плоской небольшой поверхности, что необходимо, например, при работе с полупроводниковыми детекторами ядерных частиц.

Четвертый и пятый методы, уже применявшиеся ранее ^{/5-8/}, детально исследовались в настоящей работе. Целью опытов, проводившихся на выведенном пучке 150 см циклотрона ЛЯР ОИЯИ, было получение тонкого (порядка моноатомного) слоя атомов отдачи на небольшой плоской поверхности для регистрации полупроводниковым детектором короткоживущих (до десятых долей секунды) α - активных продуктов ядерных реакций.

2. Электростатическое собиране атомов отдачи

Схема опытов по электростатическому собиранию приведена на рис. 1. Пучок ионов N^{14} (1) с энергией 100 Мэв через вакуумную входную фольгу из алюминия толщиной 8 мк (2) попадал на мишень из Nd^{142} (3) толщиной $1 \text{ мг} \cdot \text{см}^{-2}$, нанесенную на алюминиевую подложку толщиной 8 мк. Образовавшиеся α - излучатели No^{151} и No^{152} /9/ выбивались из мишени и попадали в камеру (4), заполненную техническим газом с содержанием примесей 0,1%. После торможения в газе они электростатическим полем собирались на сборник ядер отдачи (5), который после цикла облучения, обычно равного 30 сек, поворачивался на определенный угол и попадал под полупроводниковый детектор (6), которым производилась регистрация полученной α - активности. И мишень, и входная фольга были зажаты в медных коллиматорах с соосными отверстиями диаметром 2 мм и глубиной 1 мм, расположенными по площади $10 \times 16 \text{ мм}^2$ таким образом, что прозрачность коллиматора составляла 86% для нормально падающего пучка. Сборник ядер отдачи представлял собой латунный диск диаметром 8 мм. Электрический контакт с проводником, по которому подавалось напряжение, осуществлялся в центре диска внизу. Расстояние сборника от оси пучка составляло 3 см, а от плоскости мишени 2 см. Измерение тока ионов осуществлялось находившимся в газе цилиндром Фарадея (7), связанным с интегратором тока. Ввиду сильного искажения величины измеряемого то-

ка за счет присутствия газа (до двух-трех раз), реальное значение тока определялось при откачке газа из камеры. За эффективность сбора принималось определенное по α - счету отношение числа собранных электростатически атомов отдачи к числу атомов отдачи, полученных при тех же условиях облучения в опытах по прямому выбиванию в сборник из алюминиевой фольги.

Данные по зависимости эффективности сбора от величины и знака приложенного к сборнику напряжения при токе ионов 0,3 мка приведены на рис. 2. Собиране атомов отдачи на сборник с положительным потенциалом, как уже отмечалось в ^{/10/}, свидетельствует об образовании в ионизованном газе каких-то органических комплексов с зарядом, противоположным первоначальному заряду продуктов отдачи. Сильная зависимость коэффициента сбора атомов отдачи от величины используемого тока иллюстрируется данными, приведенными на рис. 3.

Низкий коэффициент сбора и его зависимость от величины тока ионов, по-видимому, обусловлены большой плотностью плазмы, образуемой в газе пучком тяжелых ионов. Оценки показывают, что с учетом рекомбинации в газе при давлении 1 атмосфера пучок ионов N^{14} с интенсивностью $1 \text{ мка} \cdot \text{см}^{-2}$ создает равновесную плотность плазмы $10^{13} - 10^{11} \text{ ионов} \cdot \text{см}^{-3}$ (при коэффициенте рекомбинации $10^{-10} - 10^{-8} \text{ см}^3 \cdot \text{сек}^{-1/11,12/}$). Чтобы в такой плазме получить разделение зарядов на 1 см, необходимо электрическое поле порядка $10^7 - 10^5 \text{ в} \cdot \text{см}^{-1}$. В образующейся плазме, видимо, основная масса атомов отдачи теряет свой заряд за счет рекомбинации на примесях с малым потенциалом ионизации и собиране идет лишь с поверхности плазменного шнура. В пользу этого предположения говорит тот факт, что когда из расположенных на мишени пяти горизонтальных рядов отверстий четыре верхних были закрыты, коэффициент сбора был тот же самый, что и в случае полностью открытой для пучка мишени. Об определяющей роли плазмы при электростатическом собирании говорят и результаты опыта, в котором на мишени для прохождения пучка было оставлено лишь одно отверстие диаметром 2 мм. В этом случае на расстоянии - 5 см от мишени значительная часть атомов отдачи выходит из плазменного шнура за счет углового распределения. В этом случае при токе 0,02 мка были получены коэффициенты сбора при положительном потенциале 45% и при отрицательном 30%. Поскольку на мишенях столь малой площади трудно получить высокие плотности тока и обеспечить тепловую сохранность мишени в случае их получения, результаты опыта с малой мишенью имеют лишь ограниченный интерес.

Измерение до 10 раз величины объема, из которого проводилось собиране, местоположения и формы сборника, его диаметра от 4 до 20 мм, установка на противоположной стороне плазменного столба дополнительного электрода, добавка примесей воздуха, азота, углекислоты до 10% не приводила к существенному изменению эффективности сбора ни в сторону увеличения, ни в сторону уменьшения. При введении продувки газа

как к сборнику, так и от сборника со скоростью $1-5 \text{ м.сек}^{-1}$ электростатическое собира-
ние резко уменьшалось.

Сбор атомов отдачи методом адсорбции из газовой струи

С целью получения высоких и не зависящих от величины используемого тока ионов коэффициентов сбора атомов отдачи при большом размере используемого пучка были поставлены опыты по исследованию особенностей сбора атомов отдачи в методике, аналогичной разработанной Махферленом и Гриффеном /8/. Эта методика основана на том, что в случае перепада давлений по обе стороны от небольшого отверстия на стороне высокого давления образуются линии тока, идущие по радиусам к этому отверстию, а на стороне малого давления получается узко направленная струя газа.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 4. Пучок ионов (1) после прохождения вакуумной фольги (2) попадает на мишень (3). Атомы отдачи выбиваются в газовую камеру (4), в которой на расстоянии 20 мм от оси пучка, имеющего те же размеры, что и в случае электростатического сбора, и на расстоянии 25 мм от плоскости мишени находится цилиндрическое отверстие диаметром 0,5 мм и глубиной 1 мм. В газовой камере (4) поддерживается давление гелия $P_1 = 0,5-1 \text{ атм}$. Гелий, выходя через отверстие, откачивается герметизированным форвакуумным насосом ВН-1, так что в основной камере поддерживается давление $P_2 = 1-4 \text{ мм рт.ст}$. Струя газа, выходящая из отверстия вместе с атомами отдачи, ударяет в поверхность сборника (5), находящегося на расстоянии 5-15 мм от отверстия. Атомы отдачи адсорбируются на сборнике и после определенного цикла облучения переносятся со сборником к полупроводниковому детектору (6), регистрирующему α -активность. С выхлопа насоса после очистки от капель и паров масла в балластном объеме (7), ватных фильтрах (8), ловушках с активированным углем, охлаждаемых жидким азотом (9) и фильтре из специальной ткани (10), гелий опять поступает в камеру, куда выбиваются атомы отдачи. Вся система, таким образом, является циркуляционной.

Герметизация насоса ВН-1 осуществлена путем замены заводского сальника на сальник с тремя вакуумными манжетами и уплотнения ряда деталей на резине. Ватный фильтр представляет собой разделенный на три последовательные секции цилиндр диаметром 60 мм и высотой 300 мм, наполненный медицинской ватой с плотностью $0,1 \text{ г.см}^{-3}$. Две ловушки с активированным углем изготовлены из стекла и с целью уменьшения сопротивления течению газа включены параллельно. В каждую из них загружено по 30 г активированного угля, что обеспечивает адсорбцию при температуре жидкого азота до нескольких литров воздуха /13/. Фильтр со специальной тканью служит для предупреждения попадания в измерительную камеру следов угольной пыли из ловушек. Балластный объем емкостью около 5 л служит для предупреждения резких изменений давления в камере для

сбора ядер отдачи при включении насоса, а также для предупреждения попадания струй масла в ватный фильтр. Дистанционный контроль за давлением P_1 (рис. 4) осуществляется с помощью электроконтактного вакуумметра (11). Вентили (12-16) служат для обеспечения раздельной откачки различных частей системы и соединения ее с установкой для откачки и наполнения гелием, а также контроля за давлением в измерительной камере и на выхлопе насоса. Последнее не должно превышать паспортного значения (1,1 атм), ибо в противном случае насос при работе перегревается.

Пучок ионов из камеры, где тормозятся атомы отдачи, через вакуумные фольги (17) попадает в цилиндр Фарадея, находящийся в объеме (18), подсоединенном к циклотрону, что обеспечивает получение не зависящих от давления и рода применяемого газа значений тока ионов.

Опыты по сборанию проводились на изотопах $^{153,152}_{\text{Er}}$ /14/, получающихся в реакции $^{144}_{\text{Sm}} (\text{C}^{12}_{3-4})$, $^{153,152}_{\text{Er}}$ $^{149/15/}$ $^{141}_{\text{Pr}}$ (C^{12}_{4n}) $^{149}_{\text{Tb}}$ и $^{248/6/}$ $^{248}_{\text{Fm}}$ из реакции $^{240}_{\text{Pu}} (\text{C}^{12}_{4n})$ $^{248}_{\text{Fm}}$. Толщина мишеней составляла $\sim 300 \text{ мкг/см}^2$.

В первых же опытах по газовому сборанию была установлена сильная зависимость величины коэффициента сбора от чистоты используемого газа. Примесь к техническому гелию $\sim 1\%$ воздуха снижала коэффициент сбора примерно вдвое, большие количества воздуха снижали коэффициент сбора примерно на порядок, после чего коэффициент сбора переставал зависеть от содержания воздуха в рабочем газе. Связано это, по-видимому, с тем, что в случае примеси воздуха к гелию образующиеся атомы отдачи окисляются, а окислы, видимо, значительно хуже адсорбируются. Об этом говорит сильная зависимость коэффициента сбора при работе на гелии с примесью воздуха от рода и состояния поверхности сборника. Так, было установлено, что покрытие любой поверхности тонким слоем вакуумной рамзаевской замазки при работе на грязном гелии в несколько раз повышает коэффициент сбора. Рамзаевская замазка существенно улучшает коэффициент сбора и при использовании вместо гелия аргона. Однако даже при использовании рамзаевской замазки коэффициент сбора на аргоне был ниже чем на гелии примерно в полтора раза. При сборе атомов отдачи с аргоном на поверхность металла, не покрытую замазкой, коэффициент сбора был в двадцать-тридцать раз ниже, чем при использовании гелия.

Включение в циркуляционную систему ловушек с активированным углем, поглощающих воздух, который может попасть в систему при некоторой ее негерметичности, делает состояние устойчивым в течение многих часов и не зависящим от состояния поверхности и материала сборника (латунь, алюминий, тефлон, полиэтилен, золото, графит). При выполнении циркуляционной системы особое внимание следует обращать на чистоту коммуникаций после ловушек с углем. При присутствии в них масла или большого количества резины их пары переносятся рабочим газом в объем, через который проходит пучок. Под действием пучка эти пары полимеризуются, образуя на сборнике довольно толстую пленку,

существенно ухудшающую амплитудное разрешение при регистрации распада собранных на сборнике атомов.

Зависимость коэффициента сбора от давления в камере с мишенью (P_1) представлена на рис. 5. Отверстие диаметром 0,5 мм, сборник (латунь) диаметром 8 мм на расстоянии 5 мм от отверстия, давление в основной камере $P_2 = 1-3$ мм л.сек⁻¹. Резкий спад эффективности сбора при малых давлениях обусловлен тем, что пробег атомов отдачи начинает не укладываться в камеру с мишенью, глубина которой составляет 50 мм.

Зависимость коэффициента сбора от давления в основной камере P_2 , полученная в той же геометрии, что и данные рис. 5, представлена на рис. 6. Видно, что высокий коэффициент сбора можно получить, используя насос с существенно меньшей производительностью, чем 18 л.мин⁻¹ которую имеет ВН-1.

Зависимость сбора от диаметра отверстия и расстояния сборника от отверстия представлена на рис. 7. Величина пятна, в котором собираются атомы отдачи, была определена В.П. Перелыгиным путем снятия распределения числа α -треков в полях зрения равной величины на фотопластинке, которая была использована в качестве сборника атомов отдачи. Полученное распределение при установке фотопластинки на расстоянии 15 мм от отверстия диаметром 0,5 мм представлено на рис. 8. В опыте с фотопластинкой, установленной на расстоянии 60 мм от отверстия, практически все треки лежали в пределах пятна диаметром 10 мм.

Амплитудное разрешение при снятии α -спектров полупроводниковым детектором целиком определялось разрешением используемого детектора (60 кэВ при регистрации α -частиц с энергией ~ 4 МэВ в геометрии, близкой к -2π). Для сравнения можно отметить, что при работе на прямом вбивании в алюминий разрешение было не лучше 200 кэВ.

Зависимость сбора от величины тока ионов C^{12} не была обнаружена при изменении величины тока от 0,1 до 5 мкА.

Прямые опыты по определению времени сбора атомов отдачи в данной геометрии не проводились, но оценки по экспериментально определенной величине скорости истечения гелия из отверстия диаметром 0,5 мм при $P_1 = 400$ мм рт.ст., составляющей 8 л.мин, дают величину, не превышающую 0,4 сек.

Очистка от масла в использованной системе фильтров вполне удовлетворительна, ибо после облучения в течение десятков часов никаких следов графитизации на мишени и масла в камере обнаружено не было.

З а к л ю ч е н и я

Автор считает своим приятным долгом поблагодарить члена-корреспондента АН СССР Г.Н. Флерова за постановку данной задачи и постоянное внимание к ней на всех этапах ее выполнения и С.М. Поликанова за руководство данной работой и всестороннюю помощь. Автор весьма признателен В.А. Чугрееву за проведение конструкторских работ, Д.В. Петрову и Н.А. Тужикову за работу по герметизации насоса ВН-1, А.Г. Белову, М.Б. Миллеру и В.М. Николаеву за помощь в проведении измерений. Автор считает необходимым отметить также очень полезные обсуждения результатов с В.А. Карнауховым, Л.П. Петровым и Д.Д. Богдановым и ценные консультации с А.Г. Зельдовичем.

Л и т е р а т у р а

1. A.Ghiorso, V.Harvey, G.Choppin, S.Thompson, G.Seaborg. Phys. Rev., 98, 1518 (1955).
2. Г.Н. Флеров, С.М. Поликанов, А.С. Карамян, А.С. Пасюк, Д.М. Парфанович, Н.И. Тарантин, В.А. Карнаухов, В.А. Друин, В.В. Волков, А.М. Семчинова, Ю.Ц. Оганесян, В.И. Хализев, Г.И. Хлебников, Б.Ф. Мясоедов, К.А. Гаврилов. ЖЭТФ, 38, 82 (1960).
3. А. Гиорсо. Частное сообщение.
4. Е.Д. Донец, В.А. Шеголев, В.А. Ермаков. Ат. энергия, 16, № 3, 195 (1964).
5. A.Ghiorso, T.Sikkeland, J.R.Walton, G.T.Seaborg. Phys. Rev. Lett., 1, No.1, 18 (1958).
6. А. Гиорсо, Ат. энергия, 7, № 4 338 (1959).
7. A.M.Friedman, W.C.Mohr. Nucl. Instrum and Meth., 17, 78 (1962).
8. R.D.Macfarlane, R.D.Griffioen. Nucl. Instrum and Meth., 24, 461 (1963).
9. R.D.Macfarlane, R.D.Griffioen. Phys. Rev., 130, 1491 (1963).
10. R.D.Macfarlane. Phys. Rev., 126, 274 (1962).
11. Дж. Кэй, Т. Лэби. Таблицы физических и химических постоянных, Физматгиз, 1962.
12. H.S.W.Massey. Adv. in Physics, 1, No. 4, 395 (1952).
13. Низкие температуры и редкие газы. Госэнергоиздат, 1958, под ред. В.Г. Фастовского.
14. R.D.Macfarlane, R.D.Griffioen. Phys. Rev., 131, 2176 (1963).
15. K.S.Toth, J.O.Rasmussen. Nucl. Phys., 16, 474 (1960).

Рукопись поступила в издательский отдел
21 июля 1965 г.

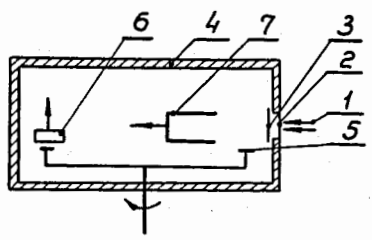


Рис. 1.

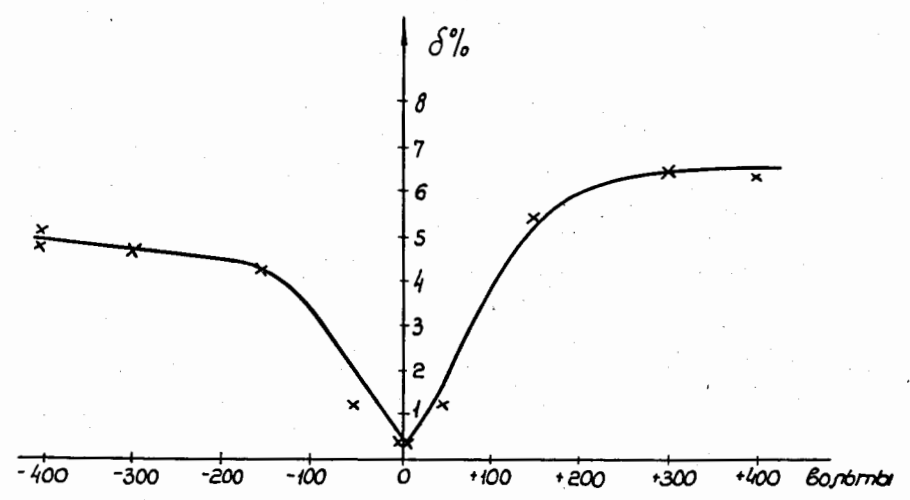


Рис. 2

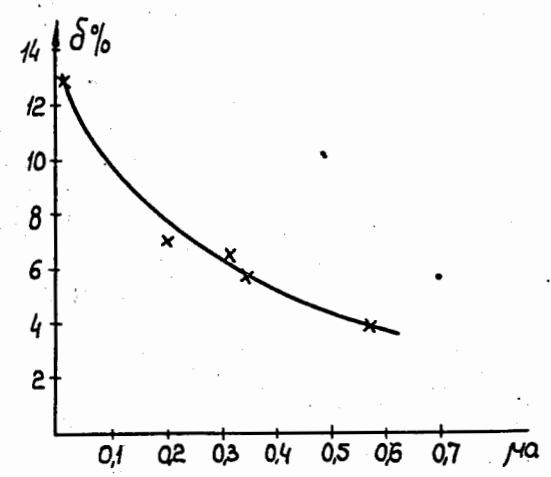


Рис. 3

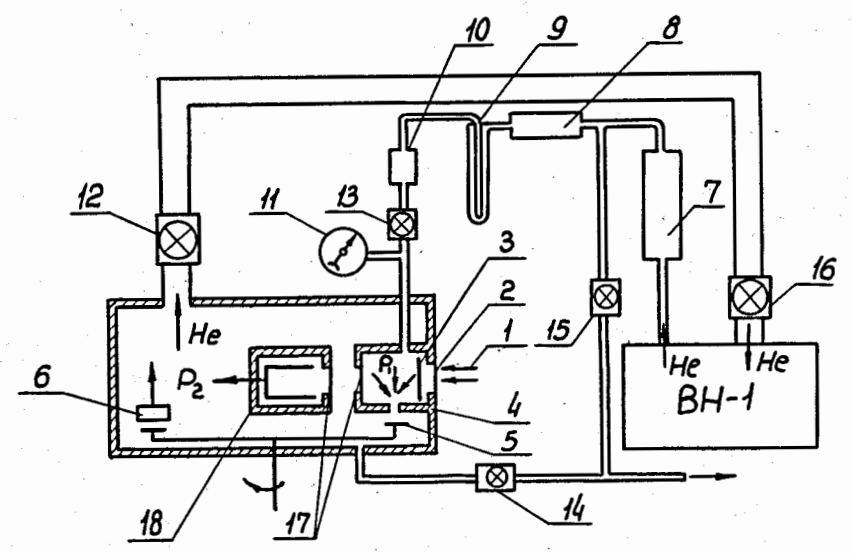


Рис. 4

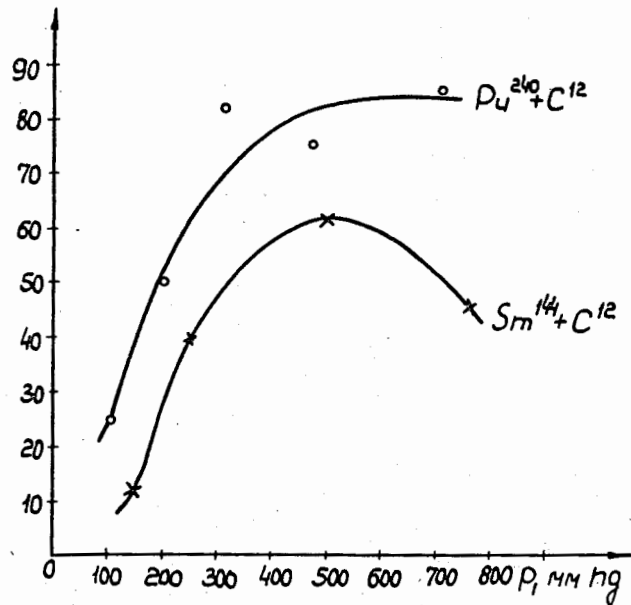


Рис. 5

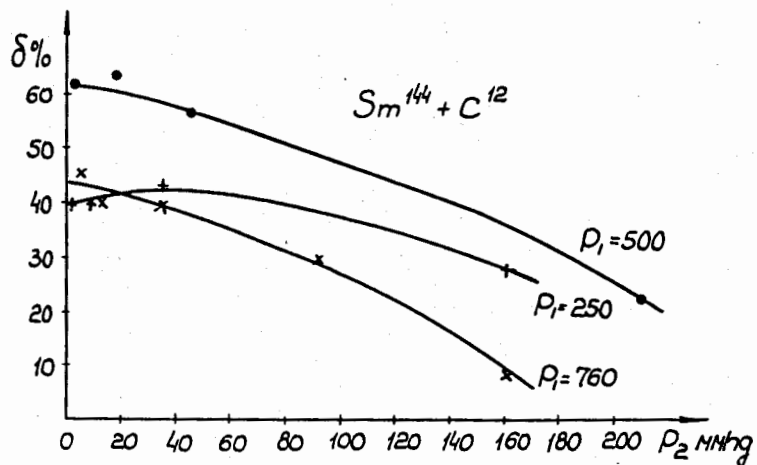


Рис. 6

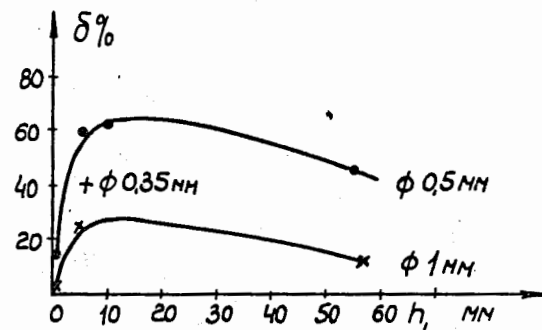


Рис. 7

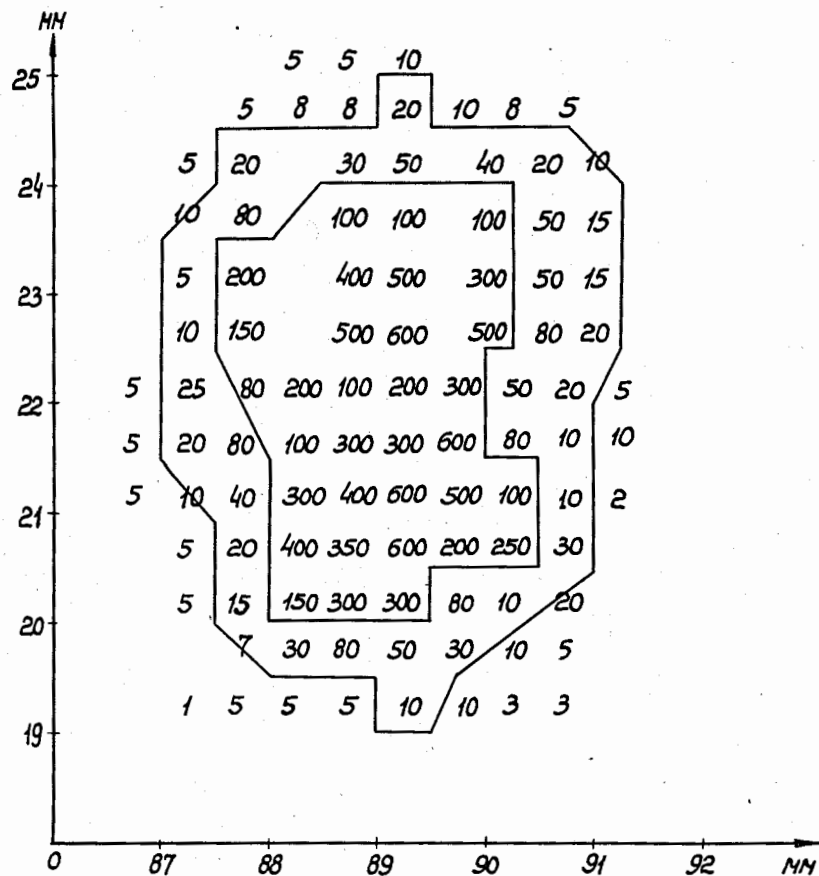


Рис. 8.