

C345

C-217



Объединенный институт ядерных исследований
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

"утверждаю"

Директор Лаборатории
ядерных проблем

И. П. Давыдов
И. П. Давыдов

"В" *Давыдов* 1963 г.

C 345

C-217

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ
ОБЛАСТИ СИНХРОЦИКЛОТРОНА ОИЯИ ПРИ ПОМОЩИ
ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ЗАПНЕ

Исполнители:

А. Сафонов
А. Востов

Сафонов А. Н.

Востов А. В.

Начальник отдела
синхроциклотрона

В. И. Давыдов

Давыдов В. И.

г. Дубна, 1963 год

Рукопись поступила
в издательский отдел

15-4-1964

с. ф. 504

А н н о т а ц и я

В работе изложены особенности моделирования электрических полей в ускорителе типа синхроциклотрон.

Описаны способы измерения электрического поля дуанта и дополнительных фокусирующих электродов. Получена картина электрического поля дуанта синхроциклотрона ОИЯИ.

Приведено описание использовавшейся электролитической ванны с полуавтоматическим потенциалографом.

. . .

I. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ПОЛЯ ДУАНТА СИНХРОЦИКЛОТРОНА

Для решения ряда задач о движении заряженных частиц в центральной области синхротрона, таких как определение начальной области устойчивых фазовых колебаний или изучение вертикальной фокусировки ускоренных пучков, необходимо знать конфигурацию электрического поля дуанта. Ввиду того, что в синхротронах обычно используется один дуант, против которого в центре магнетрона помещается ионный источник, электрическое поле в этом районе существенно неоднородно даже при наличии противоэлектронной рамки. Поэтому рассчитать аналитически конфигурацию поля вблизи ионного источника можно только в очень грубом приближении, и встает вопрос об экспериментальном измерении конфигурации электрического поля в центральной области синхротрона.

Известно, что непосредственное измерение потенциала системы электродов в воздухе принципиально невозможно, так как зонд, соединенный с измерительным прибором, нарушал бы распределение потенциала U . Если же систему электродов поместить в среду с проводимостью значительно большей проводимости измерительного прибора, то искажение, вносимое зондом будет очень малым. Распределение потенциала в системе электродов при этом не изменится, так как при отсутствии распределенных источников электростатическое поле в диэлектрике и электрическое поле тока в изотропной проводящей среде описываются уравнением Лапласа. Действительно, для электростатического поля справедливы соотношения:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}, \quad \vec{E} = - \text{grad } U, \quad \text{div } \vec{D} = 0,$$

которым в электрическом поле тока в проводящей среде соответству-

ют $\vec{\delta} = \gamma \vec{E}$, $\vec{E} = -\text{grad } U$, $\text{div } \vec{\delta} = 0$,

где \vec{D} - электрическое смещение, \vec{E} - напряженность электрического поля, ϵ - диэлектрическая проницаемость, $\vec{\delta}$ - плотность тока, γ - удельная электропроводность, U - потенциал. Комбинируя вышеуказанные соотношения получаем в обоих случаях уравнение Лапласа $\Delta U = 0$. На этом свойстве и основан метод электролитической ванны для измерения потенциальных полей.

Для измерения электрического поля в центральной области синхротронотрона необходимо изготовить масштабный макет центральной части ускорительной камеры. В зависимости от конкретной задачи такие макеты могут быть двух видов - с вертикальным расположением дуанта и с горизонтальным. Если требуется получить распределение электрического поля в вертикальной плоскости симметрии (либо в параллельной ей плоскости), то выгоднее использовать макет с вертикальным расположением дуанта, совмещающая плоскость измерения с поверхностью электролита, как показано на рис. 1а. Так как силовые линии (линии тока) не пересекают плоскостей симметрии, то любую плоскость симметрии можно заменять непроводящей плоскостью, причем в оставшейся части макета распределение потенциала не изменится¹²¹. Это свойство полезно с точки зрения большей доступности макета для измерений и возможности использовать в данной ванне модели большего масштаба. Так: в указанном на рис. 1а случае используется половина макета камеры ускорителя. При наличии симметрии системы относительно medianной плоскости можно использовать четверть макета, совмещающая с medianной плоскостью лист плексигласа (рис. 1б), либо какую-нибудь другую непроводящую плоскую поверхность (например, стенку электролитической ванны).

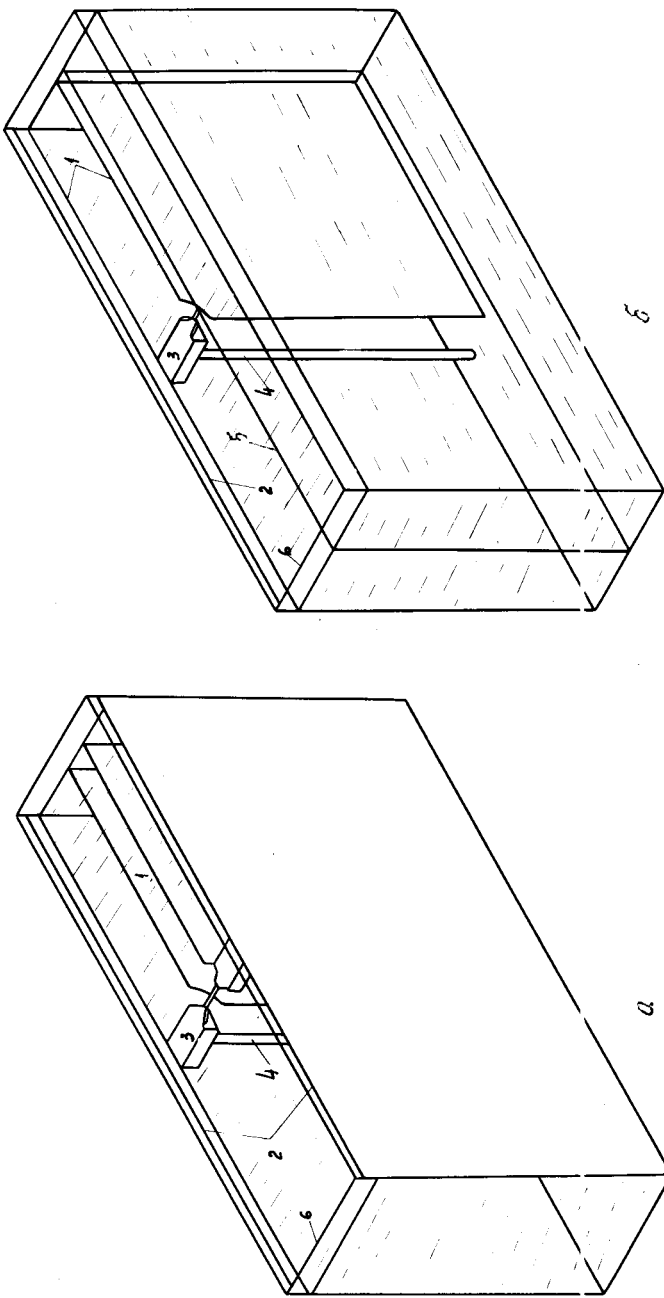


Рис. 1 Схема ванны с вертикальным расположением дуанта
 а) Моделирование $\frac{1}{2}$ камеры б) Моделирование $\frac{1}{4}$ камеры.
 1) дуант, 2) крышки камеры, 3) ионный источник, 4) труба ионного источника, 5) лист плексиглаза, 6) плексиглазовые стенки ванны.

Если требуется найти распределение потенциала в медянной плоскости, то удобнее использовать макет с горизонтальным расположением дуанта. В этом случае медянная плоскость совмещается с поверхностью электролита, как показано на рис. 2. При наличии симметрии относительно вертикальной плоскости, проходящей через источник перпендикулярно дуанту, и в этом случае может быть использована четверть макета, если эту плоскость заменить листом плексигласа.

При моделировании электрического поля центральной области синхротрона особое внимание следует обратить на влияние стенок электролитической ванны. Для полного исключения влияния стенок макет должен моделировать четверть ускорительной камеры (при двух плоскостях симметрии) с тремя боковыми стенками и нижней крышкой. Однако при этом должен быть найден компромисс между желанием иметь возможно больший масштаб моделирования для повышения точности измерений и размерами ванны, которые ограничиваются весом ванны с электролитом и конструкцией копировального устройства. При изучении электрического поля в центральной области синхротрона нет необходимости моделировать полностью четверть ускорительной камеры. Обычно влияние непроводящих стенок ванны пренебрежимо мало в изучаемой области, если стенки удалены от нее на расстояние, примерно в 5 раз превышающее поперечный размер макета. Так как непроводящая стенка в этом случае становится как бы плоскостью симметрии, то источник возмущения ("отраженный" ионный источник) оказывается от измеряемой области на расстоянии, в 10 раз превышающем поперечные размеры макета.

Для изготовления электродов макета лучше всего применять листовое недуженое железо, так как образующаяся при контакте с элек-

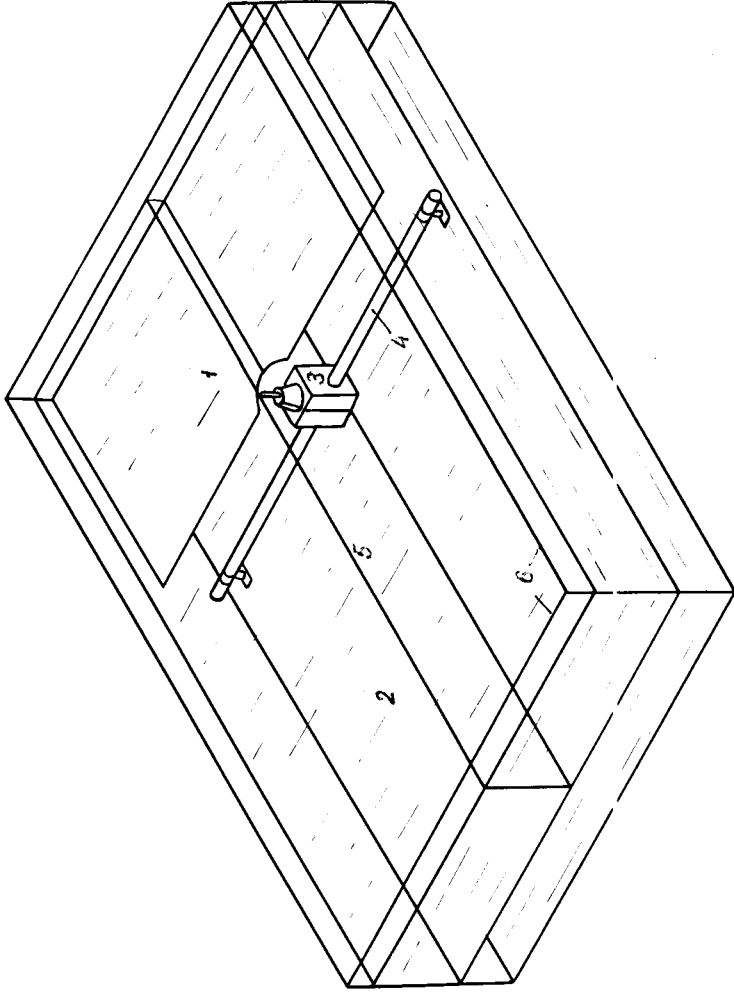


рис.2 Схема ванны с горизонтальным расположением диаметра

- 1) диаметр, 2) крышка камеры, 3) ионный источник, 4) труба ионного источника
- 5) лист плексиглаза, 6) плексиглазовые стенки ванны.

тролитом пленка окиси железа (ржавчина) имеет такую же проводимость как и железо и не вызывает искажения потенциального поля.

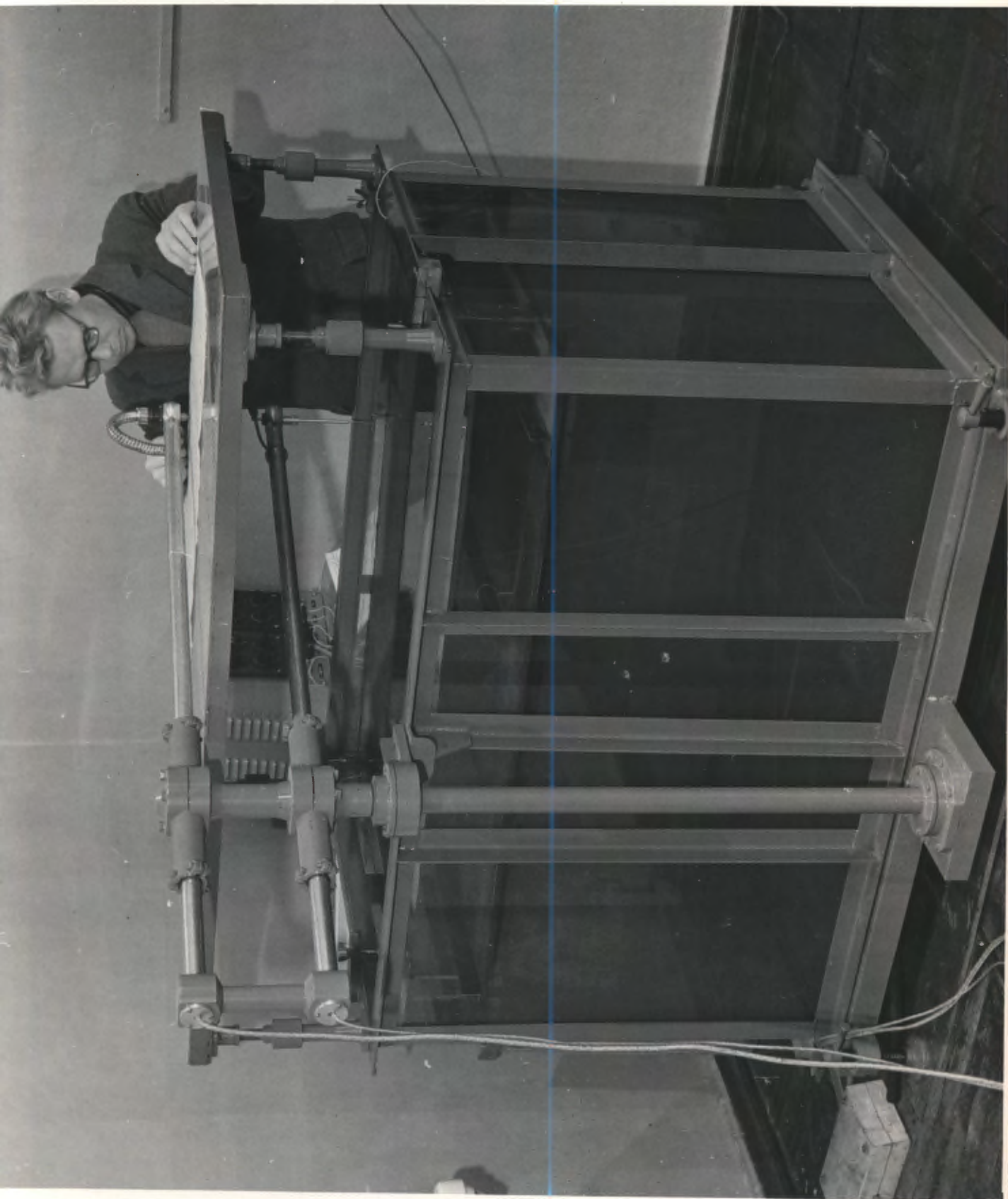
В качестве электролита можно использовать обычную водопроводную воду, хорошо удовлетворяющую требованиям, предъявляемому к электролиту- иметь проводимость среднюю между проводимостью металла и диэлектрика.

Электролитическую ванну следует наполнять водой примерно за сутки до измерений, в противном случае, осаждающиеся на электродах пузырьки растворенного в воде газа могут исказить распределение потенциала.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ СИНХРОЦИКЛОТРОНА

Для измерения потенциального поля дуанта синхроциклотрона и изучения поля дополнительной фокусирующей системы была сконструирована и изготовлена в ЭИИ ДИП электролитическая ванна размером $120 \times 80 \times 80 \text{ см}^3$ с двухтанговой копировальной системой (фото 1). В радиотехнической группе отдела синхроциклотрона был изготовлен специальный прибор- полуавтоматический потенциалограф, позволяющий значительно сократить время измерений. В него входят: блок питания электродов макета, блок задания эквипотенциалей, блок регистрации эквипотенциалей. Описание прибора и принцип действия приведены ниже. Макет четверти ускорительной камеры в масштабе 1:2 с горизонтально расположенным дуантом был изготовлен в физико-вакуумной группе отдела синхроциклотрона (фото 2). Макет дуанта, крышки и источника ионов выполнены из обычного листового железа толщиной 1 мм.

При помощи макета, изображенного на фото 2 в электролитической ванне были исследованы электрические поля в центральной области



Фиг. 1.

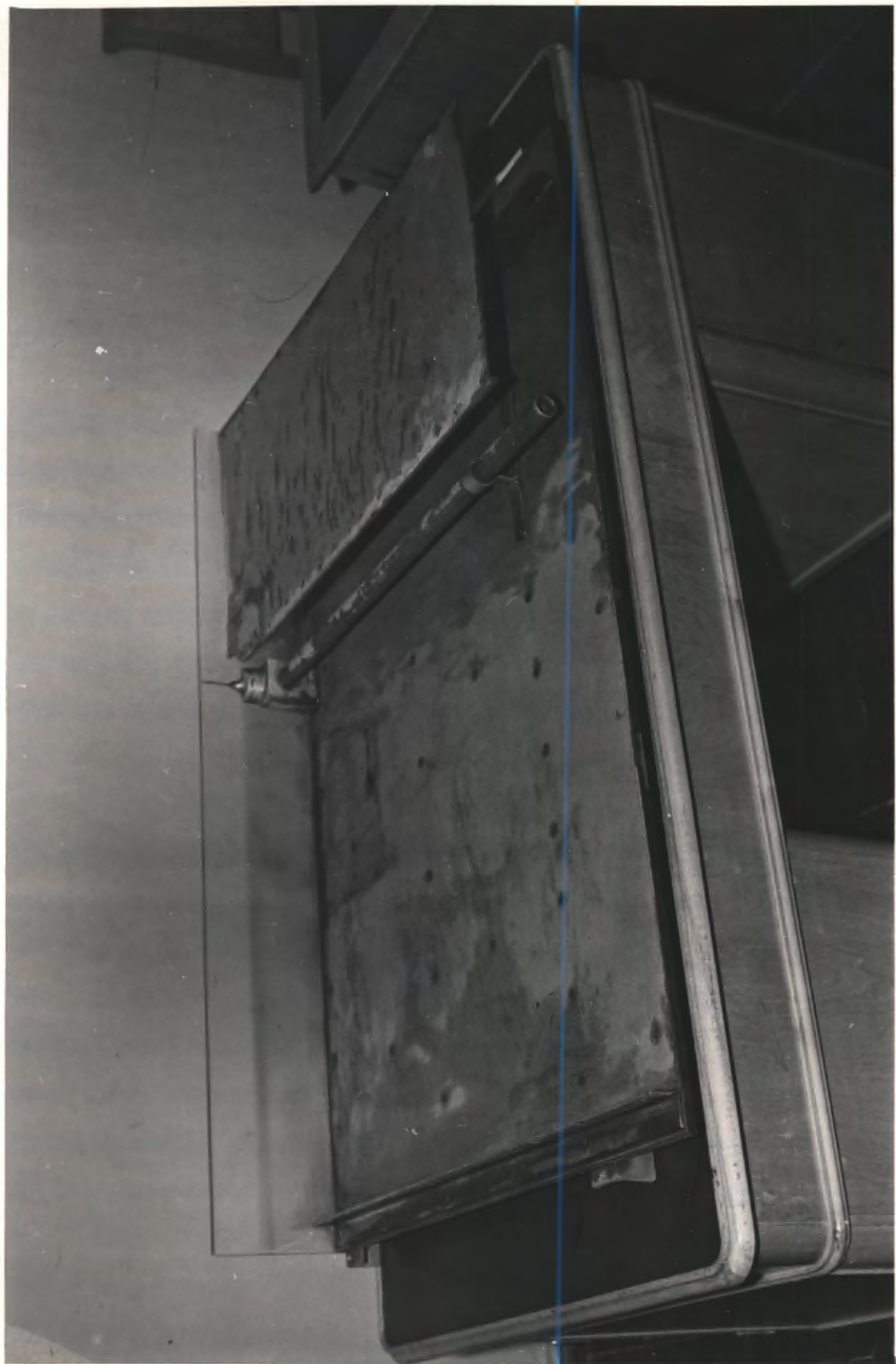


Фото 2.

синхроциклотрона для решения важнейших задач о движении в этой области ускоряемых частиц. Так, изучение потенциального поля дуанта в медянной плоскости дает возможность найти зависимость максимально-возможного набора энергии за оборот от радиуса орбиты. Эта зависимость необходима при рассмотрении начального фазового движения ионов, определяющего эффективность захвата частиц в процессе ускорения.

При измерении потенциального поля дуанта макет помещался в электролитическую ванну так, чтобы поверхность электролита сошла с медянной плоскостью. Регистрация эквипотенциальных линий производилась перемещением по поверхности электролита зонда, укрепленного при помощи зондодержателя в нижней штанге копировальной системы. Эквипотенциалами в данном случае представляют из себя сечение медянной плоскостью поверхностей разного потенциала, обладающих заметной кривизной. Поэтому глубина погружения зонда в электролит должна быть минимальной (не более 0,5 мм), чтобы не снижалась точность измерений. Искомая эквипотенциаль задается соответствующей установкой релейных контактов потенциалографа. В момент пересечения зондом эквипотенциала на прожигатель, укрепленный на конце верхней штанги, подается высокое напряжение. Искра с прожигателя оставляет след на бумаге, помещаемой на алюминиевой плите над поверхностью электролита. Совершая колебательные движения копировальной системой около предполагаемой эквипотенциали, достаточно быстро получаем четкий след этой эквипотенциали на бумаге. После этого, изменяя положение курбелей прибора, задаем для регистрации другую эквипотенциаль и весь процесс повторяется. Полную картину эквипотенциальных линий с шагом в 0,1 максимального напряжения можно получить за 20-30 минут в зависимости от сложности измеряемого распределения потенциала. На рис. 3 показана снятая этим методом картина потенциального поля дуанта синхроциклотрона ОИЯИ в медянной плоскости. Видна существенная неоднородность

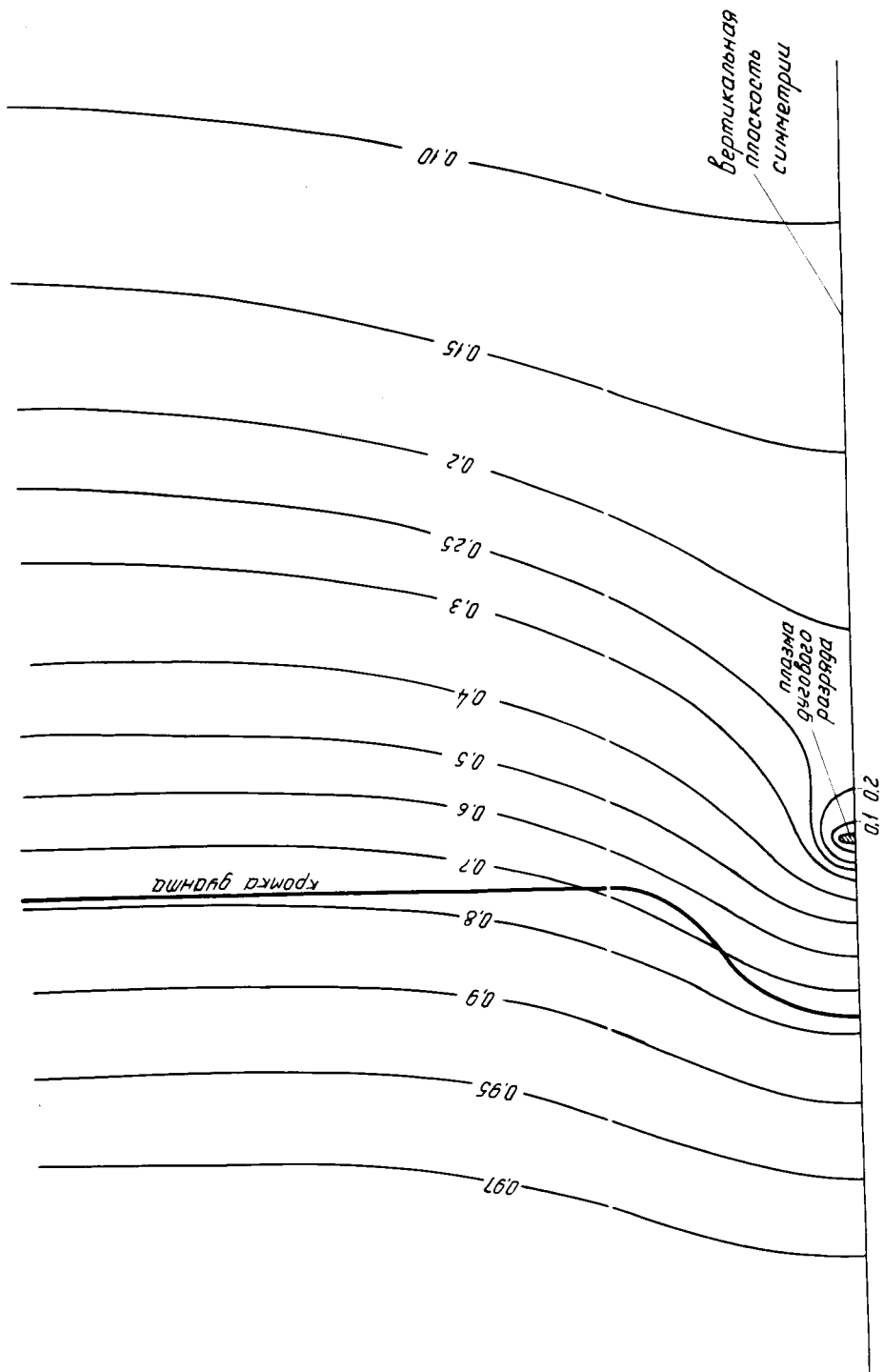


Рис.3 Распределение электрического поля в meridional плоскости синхротронного кольца.

ускоряющего электрического поля вблизи ионного источника. Для измерения подобного распределения потенциала в плоскостях, параллельных медной, на зонд одевается тонкий изоляционный чехол (обычно хлорвиниловая изоляция монтажного провода) таким образом, чтобы не изолированным оставался только кончик зонда не более 0,5 мм. Затем зонд вместе с зондодержателем опускается на требуемую глубину и производится регистрация эквипотенциалей вышеописанным методом.

На рис. 4 и 5 показаны также распределения потенциала в вертикальной плоскости симметрии ускорительной камеры при наличии ионного источника и без него, соответственно. Эти распределения получены при помощи макета половинной камеры с вертикально расположенным дуантом. При этих измерениях трубы ионного источника не моделировались, а в центре дуанта имелись плоские флэра, закрывавшие полукруглый вырез. Видно значительное влияние источника ионов на распределение потенциального поля дуанта.

На электролитической ванне потенциалографом была кроме того решена задача об измерении электрического поля, создаваемого дополнительными фокусирующими электродами вблизи центра ускорителя. Для этого потребовалось разработать специальную методику измерения потенциала, так как способ регистрации эквипотенциалей в этом случае непригоден ввиду специфичности задачи. Необходимо было найти распределение вертикальной составляющей дополнительного фокусирующего поля в центральной области синхротрона в зависимости от азимута для различных радиусов орбиты и расстояния до медной плоскости. Если использовать обычный метод, то для решения задачи потребовалось бы получить большое количество распределений потенциала в плоскостях, параллельных медной. При этом шаг задания эквипотенциалей должен быть достаточно малым, так чтобы из полученных распределений можно

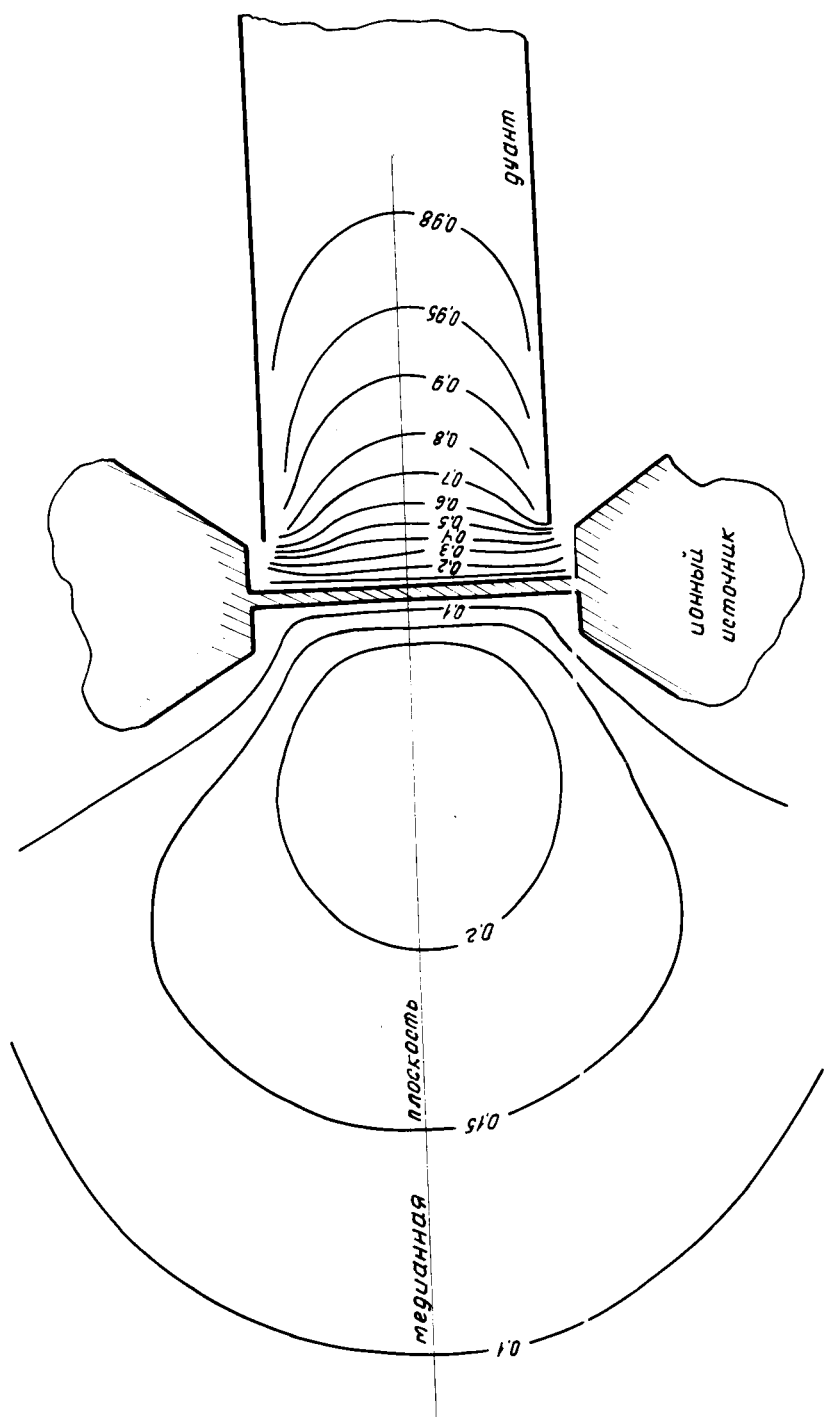


Рис. 4 Распределение электрического поля дуанта в вертикальной плоскости симметрии.

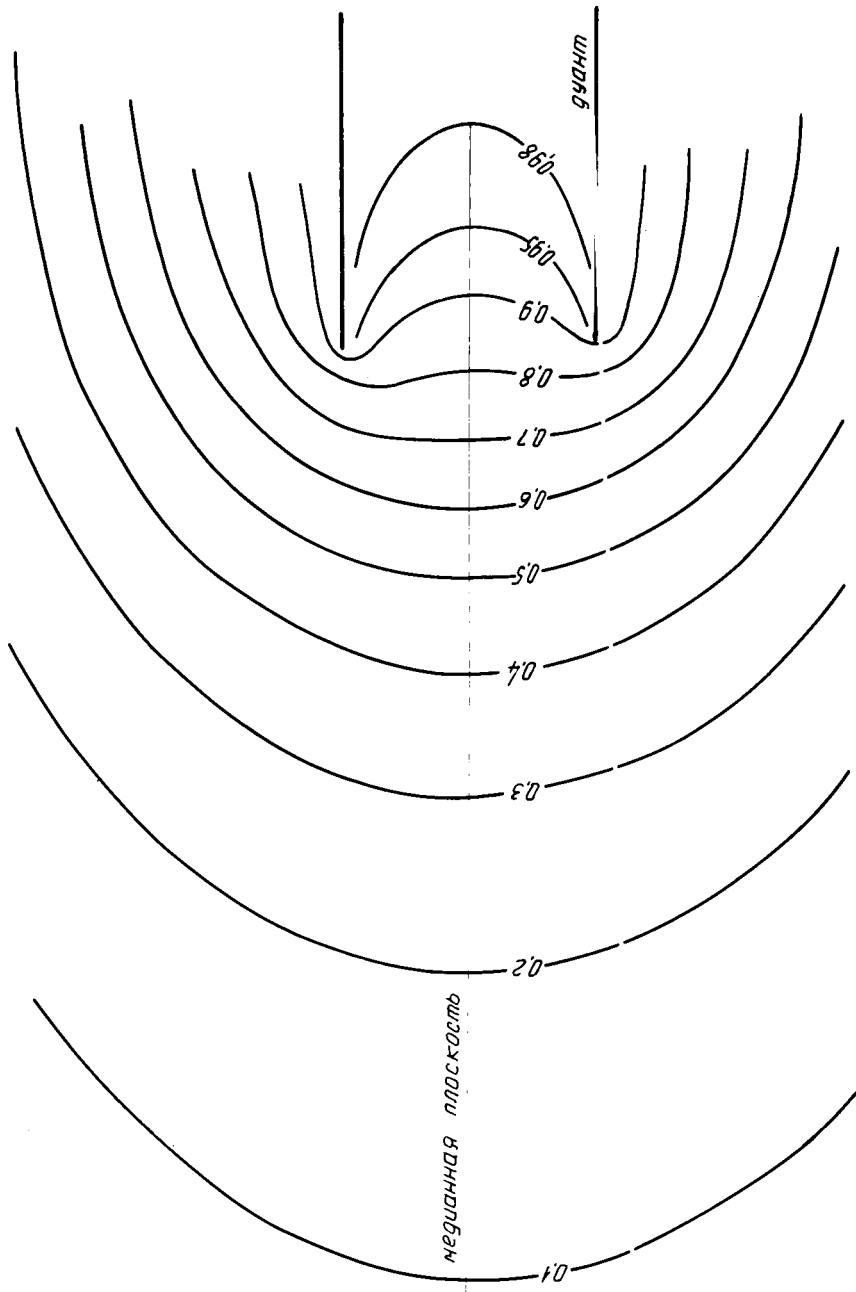


Рис. 5. Распределение электрического поля дуга в вертикальной плоскости вдали от ионного источника.

было найти зависимость потенциала от расстояния до медянной плоскости на разных азимутах и радиусах. Точность окончательных результатов естественно была бы не велика. Поэтому использовался метод, обратный методу нахождения эквипотенциалей. Зонд устанавливался в заданную точку исследуемой области и переключением кюрбелей потенциалографа добивались минимального тока на зонд и срабатывания электронной схемы. Координатная сетка с требуемым шагом по азимуту и по радиусу укреплялась на алюминиевой плите соответствующим образом. Вертикальная координата задавалась глубиной погружения изолированного (кроме 0,5 мм на конце) зонда. Дополнительный контроль сигнала с зонда осуществлялся при помощи осциллографа. Чтобы получать значения потенциала в измеряемой точке непосредственно в долях потенциала, приложенного к дополнительному электроду, переключение кюрбелей для достижения минимального тока на зонд должно производиться так, чтобы суммарное сопротивление правого и левого магазинов сопротивления было равно 10000 ом. При этом отношение потенциала в данной точке к потенциалу на электроде измеряется с точностью до четырех знаков после запятой. Искомое значение вертикальной составляющей электрического поля дополнительных электродов получается дифференцированием зависимости потенциала от Z , поэтому зависимость потенциала от Z измеряется при неизменных r и φ , так как незначительная неточность повторной установки r и φ может заметно исказить зависимость потенциала от Z , а, следовательно, и величину вертикальной составляющей напряженности электрического поля. Этот метод не дает картину потенциальных линий, значения потенциала записываются в таблицу, а напряженность электрического поля находится численным или графическим дифференцированием.

3. ОПИСАНИЕ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПОТЕНЦИАЛОГРАФА

Потенциалограф, принципиальная схема которого изображена на рис.6, включает в себя следующие устройства.

1. Блок питания электродов ванны. Он состоит из трансформатора с четырьмя отпайками на вторичной обмотке и переключателя напряжения для подачи на электроды переменного напряжения в 10, 30, 55 и 95 вольт в зависимости от размера макета и общего сопротивления электролита. Первичная обмотка трансформатора содержит 762 витка провода ПЭЛ диаметром 0,5 мм. Вторичная обмотка имеет 180 витков провода ПЭЛ диаметром 1,2 мм с отпайками от 38, 74, 110 и 140-го витков. Трансформатор рассчитан на предельный ток в 2 а.

2. Блок задания эквипотенциален, выполненный на магазинных сопротивлениях КНС-4 (НБ 020371 и П16770). Сила тока, протекающего через магазины, не должна превышать 16 ма.

3. Блок регистрации эквипотенциалей, состоящий из

- 1) усилителя входного сигнала, собранного на двух лампах 6Н9С, каждая из которых в отдельности представляет несимметричный балансный каскад;
- 2) фазового детектора, собранного на лампе 6Н9С с использованием поляризационного реле;
- 3) рабочей части, в которую входят рабочее реле НКУ-48, выпрямитель и индукционная катушка высокого напряжения.

Потенциалограф действует следующим образом. При собранной для измерений системе электродов сигнал с зонда подается на сетку одной половины двойного триода лампы 6Н9С (Π_T). Сетка другой половины лампы заземлена. Обе половины лампы имеют общее катодное сопротивление и представляют несимметричный балансный каскад. С анодов лампы Π_T

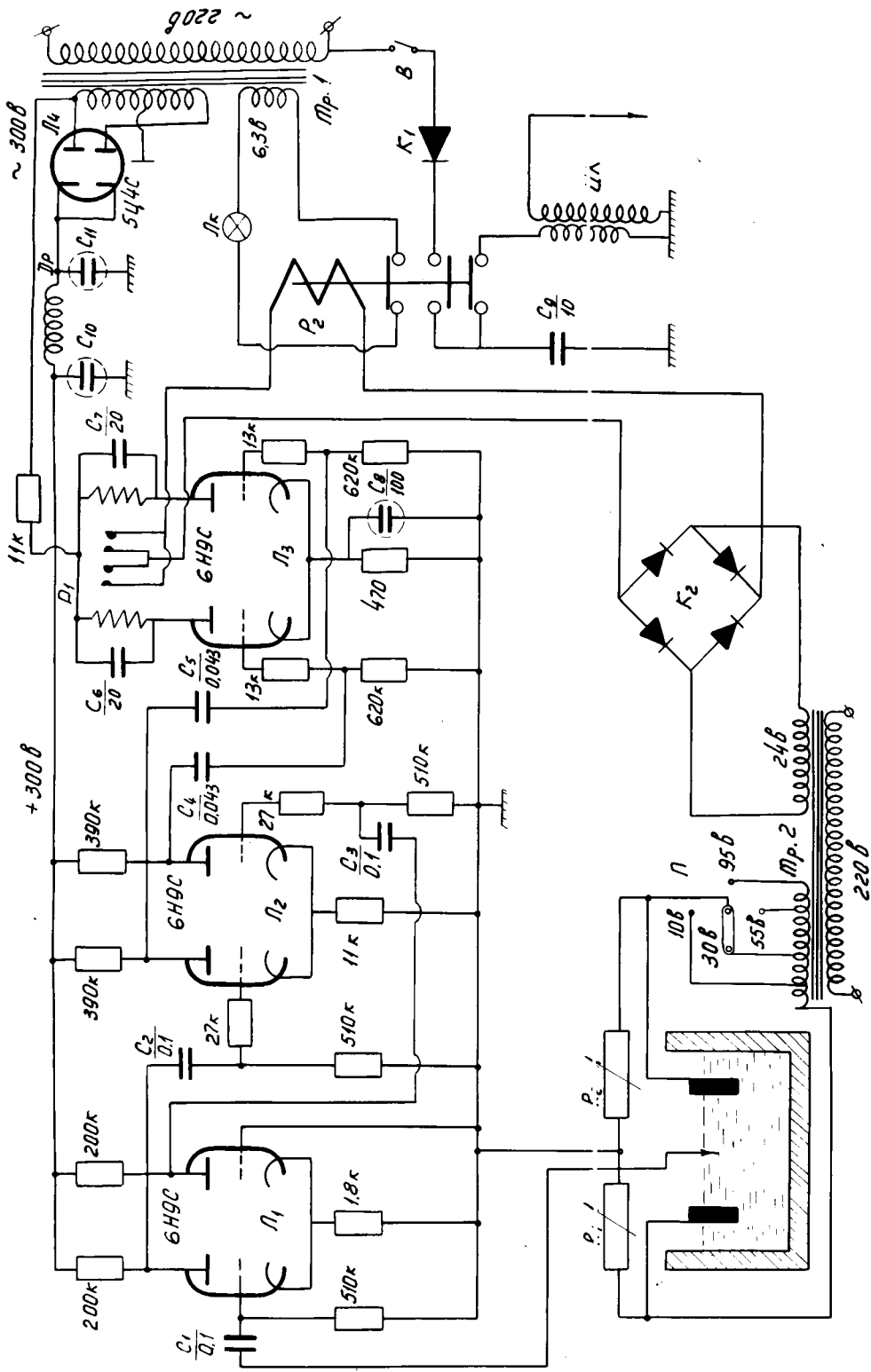


Рис. 6 Принципиальная схема потенциолографа.

напряжение в противоположных фазах подается на сетки лампы 6Н9С (L_2), которая работает аналогично первой. Усиленный сигнал поступает с анодов лампы L_2 на управляющие сетки фазового детектора (L_3) в противоположных фазах. На аноды лампы L_3 подается переменное напряжение 300 в через обмотки поляризационного реле (P_1). Будет работать та половина лампы L_3 , в которой фаза сигнала на управляющей сетке совпадает с фазой напряжения на аноде. Анодный ток работающей половины лампы L_3 (6Н9С) переведет якорь поляризационного реле P в крайнее положение. Конденсатор рабочего каскада C_2 будет заряжаться от сети через выпрямитель K_1 . При отсутствии сигнала входной лампы токи через половины лампы L_3 равны, и якорь реле устанавливается в среднее положение между контактами. В этот момент загорается красная лампочка над клеммой с надписью "зонд". При приближении зонда к эквипотенциалу ток с зонда стремится в нуль и при пересечении эквипотенциала меняется фаза входного сигнала, вследствие чего меняются фазы входных сигналов с анодов лампы L_2 , запирающие одну и отпирающие другую половину лампы фазового детектора, соответственно. Якорь реле P из одного крайнего положения переходит в другое. В момент разрыва контакта срабатывает рабочее реле P_2 (МКУ-48), замыкающее конденсатор C_3 на первичную обмотку индукционной катушки ИК. Высокое напряжение от катушки по высоковольтному проводу подводится к прожигателю на верхней штанге копировального устройства. Искра, проскакивающая с прожигателя на алюминиевый лист, оставляет след на бумаге, укрепленной на листе.

В заключение авторы благодарят В. И. Данилова и И. Б. Енчевича за ценные замечания, В. Б. Бухину за советы при выборе схемы прибора и всех сотрудников, принявших участие в изготовлении прибора.

ЛИТЕРАТУРА

1. И.И.Тетельбаум. Электрическое моделирование. ГИИИЛ, 1959.
2. В.М.Кельман. Электронная оптика. Изд. АН СССР, 1955 г.

...

П Р И Л О Ж Е Н И Е

ПРАВИЛА РАБОТЫ НА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ВАННЕ С ПОТЕНЦИАЛОГРАФОМ

Прежде, чем начать измерение распределения электрического поля (регистрацию эквипотенциалей) при помощи электролитической ванны с потенциалографом, необходимо выполнить следующие операции по подготовке прибора к работе.

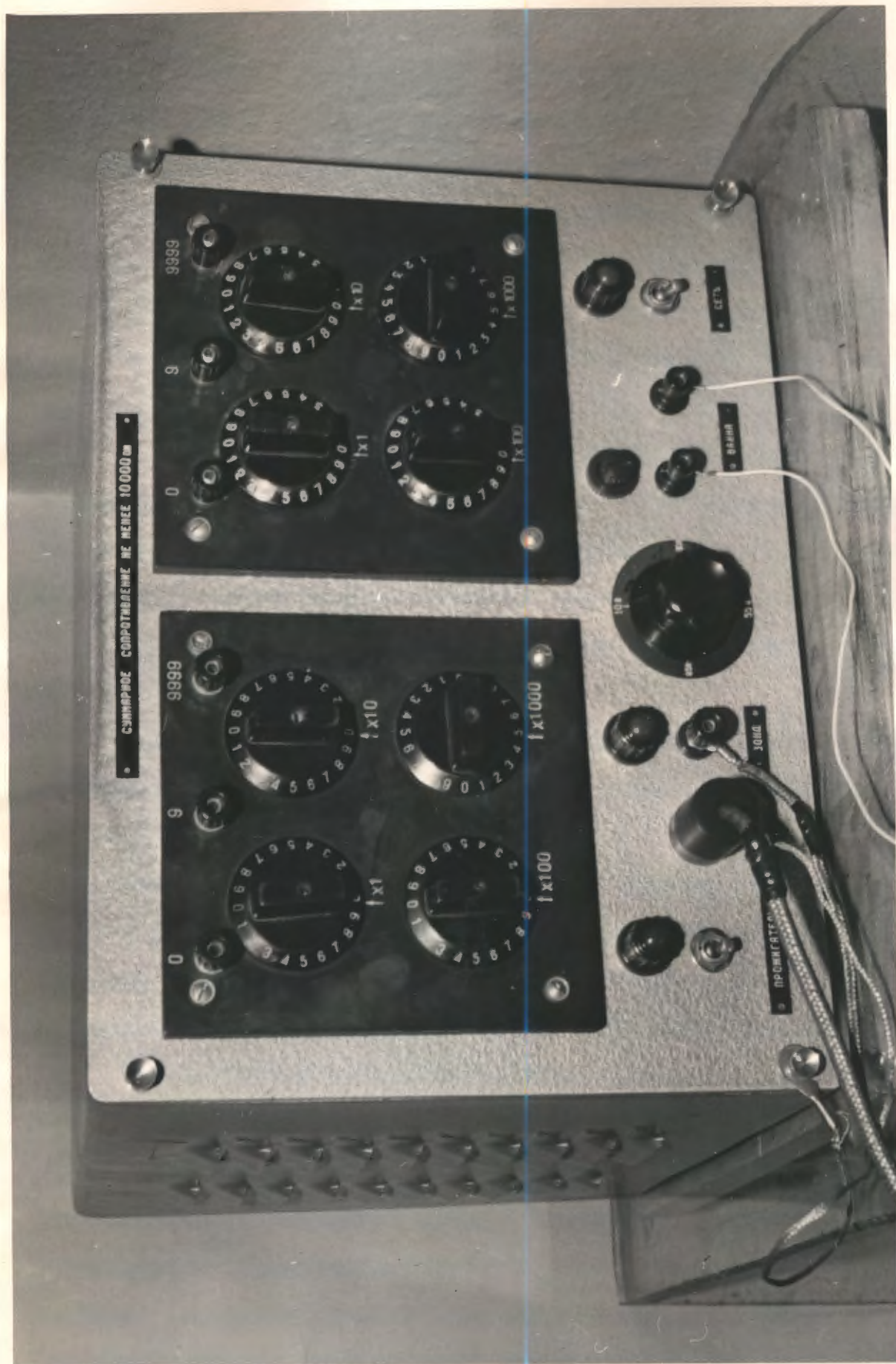
Погрузить макет системы, распределение поля в которой требуется найти, в ванну, наполненную водой примерно за сутки до этого.

Закрепить макет так, чтобы установленный в крайнем верхнем положении зонд (нижняя риска на зондодержателе), касаясь электролита, не погружаясь в него более, чем на 0,5 мм. Поверхность электролита при этом должна быть совмещена с медной плоскостью (либо с вертикальной плоскостью симметрии) макета дуанта.

Положить бумагу на алюминиевую плиту над поверхностью ванны и, прикасаясь зондом к характерным точкам макета, перенести на бумагу очертание электродов.

На потенциалографе, показанном на фото 3, поставить переключатель напряжения для питания электродов макета в нужном для работы положении, т.е. 10, 30, 55 или 95 вольт. Эти значения напряжения, подаваемого на электроды макета в ванне, используются при сопротивлении электролита, не меньшем 5, 15, 30 или 50 ом, соответственно. Сопротивление измеряется между концами проводов, идущими к электродам макета, погруженного в электролит.

Подсоединить концы проводов, идущих от зонда, прожигателя, каркаса ванны (земля) и электродов макета к соответствующим клеммам на потенциалографе.



Ромо 3.

Убедиться, что суммарное сопротивление магазинов не менее 10000 ом, так как при меньшем сопротивлении ток в магазинах может превысить допустимый, что повлечет за собой порчу прибора.

Прибор питается переменным напряжением 220 вольт от лабораторного щитка, поэтому жилу питающего кабеля подсоединить к фазной клемме, а оплетку кабеля к земляной клемме лабораторного щитка.

Затем включить пакетник на щитке и тумблер "сеть" на приборе. Должна загореться красная лампочка над тумблером "сеть".

Для задания исследуемой эквипотенциали подобрать необходимое соотношение сопротивлений на магазинах, характеризующее эту эквипотенциаль. При переключении курбелей магазинов следить, чтобы суммарное сопротивление даже на короткое время не было меньше 10000 ом.

Включить тумблер "прожигатель", при этом должна загореться красная лампочка над тумблером.

Эквипотенциаль автоматически отмечается на листе бумаги при колебательных движениях копирующей системы около предполагаемого местоположения эквипотенциали.

Вследствие значительной постоянной времени срабатывания рабочего реле разброс точек зависит от скорости колебательных движений и величины сигнала на зонд вблизи эквипотенциали. Точность повышается при малой скорости и небольших колебаниях зонда около эквипотенциали.

При измерении потенциала системы электродов при помощи координатной сетки тумблер "прожигатель" должен быть ^включен.

После приведения в соответствие координатной сетки на листе алюминия над поверхностью ванны с положением электродов макета, зонд установить в исследуемую точку и переключением курбелей необходимо добиться загорания красной лампочки над клеммой "зонд". Получаемые при этом значения сопротивлений на левом и правом магазинах сопротив-

ления следует записать в таблицу, убедившись, что суммарное сопротивление равно 10000 ом. При переключении кюрбелей следить по осциллографу, чтобы сигнал с зонда уменьшался. В случае, если красная лампочка над клеммой "зонд" горит при нескольких положениях кюрбелей, в таблицу записываются средние значения сопротивлений.

Устанавливая зонд в другие точки исследуемой области, измерения продолжать описанным выше способом.

Следует иметь в виду, что уровень воды в электролитической ванне понижается вследствие испарения примерно на 1-2 мм за сутки. Поэтому при исследовании объемной системы электродов необходимо уровень воды поддерживать постоянным, чтобы не изменялось распределение потенциала. Для этого в начале измерений нужно выбрать контрольную точку и записать положение зонда в электролите и значения потенциала в этой точке. Если при установке зонда в контрольную точку после длительной работы регистрирующий прибор не срабатывает, т.е. не загорается красная лампочка над клеммой "зонд", то следует доливать воду до тех пор, пока не загорится красная лампочка.

Распределение потенциала практически не искажается при условии, что уровень воды восстанавливается через каждые 3-4 часа непрерывной работы на ванне.

После окончания измерений (или при длительных перерывах) выключить прибор, включить пакетник на лабораторном щитке и отсоединить питающий кабель. Зонд поднять над электролитом и застопорить контрольную систему. Отсоединить концы, идущие к клеммам "ванна".