

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ АН СССР *28*
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

К.К.Шрайнер

ЭЛЕКТРОДНАЯ СИСТЕМА
УСТАНОВКИ ПСП-2

ПРЕПРИНТ 80-81



Новосибирск

ЭЛЕКТРОДНАЯ СИСТЕМА УСТАНОВКИ ПСП-2

Шрайнер К.К.

А Н Н О Т А Ц И Я

Рассматривается конструкция системы, создающей радиальное электрическое поле в открытой магнитной ловушке со скрещенными магнитными и электрическими полями ПСП-2, и технология изготовления и сборки отдельных её элементов. Особенностью системы является большая напряженность электрического поля $E(z) = 100$ кВ/см, большие поверхности и размеры (суммарные поверхности электродов порядка 60 м^2 , длина системы ~ 2 м, наибольший диаметр электрода $\sim 1,1$ м), а также наличие твердой, вакуумной и газовой изоляций и 25 коаксиальных кольцевых электродов с наибольшим диаметром в пробочной части ловушки 720 мм и межэлектродным зазором $4 \pm 0,2$ мм.

Одной из наиболее сложных инженерно-физических проблем в термоядерной плазменной ловушке с вращающейся плазмой, схема которой показана на рис.1, является создание в плазме радиального электрического поля с принудительным распределением потенциала $E(r)$ по радиусу.

В дальнейшем систему, создающую в плазме радиальное электрическое поле, будем называть электродной системой.

1. Основные требования к системе.

Установка ПСП-2 предназначена для проведения экспериментов с вращающейся плазмой, параметры которой близки к термоядерным. В этих экспериментах должны быть изучены как целый ряд физических проблем, так и многие инженерно-технические проблемы, возникающие при создании на этом принципе термоядерного реактора (к числу инженерных проблем относятся, в частности, проблема высокого напряжения как на электродах в плазме, так и на других элементах установки, проблема высоковольтной тренировки, проблема равномерности электрического поля и т.д.)

Как показано в [1] основные физические требования, предъявляемые к электродной системе термоядерного реактора с вращающейся плазмой, заключаются в следующем:

1. На электродах (соответственно в плазме) необходимо иметь радиальные электрические поля $E(r)$ с напряженностью до 100 кВ/см, т.е. электрические поля, близкие к предельным, полученным в вакуумных промежутках.
2. Полное напряжение U , приложенное к электродам (и соответственно к плазме), должно быть достаточно большим, порядка нескольких мегавольт (из условия устойчивости и уровня радиальных энергетических потерь).
3. Напряженность электрического поля $E(r)$ должна меняться по радиусу по заданному закону.

Для решения этих требований была предложена система, состоящая из большого числа вложенных коаксиальных электродов, причем потенциал на каждой паре этих электродов создается независимыми источниками питания.

Подробное описание этой системы приведено в п.3. В связи с этим возникают дополнительные требования к электродной системе.

- а) Для того, чтобы ионы, уходящие на торец, не проникали в зазор между электродами, а рекомбинировали на торцевой поверхности, необходимо, чтобы расстояние между электродами было меньше двух ларморовских радиусов ионов $\Delta < 2\rho_i$.
- б) Во избежание возникновения разряда с осциллирующими электронами во внутренних объемах электродной системы необходимо, чтобы любая силовая линия магнитного поля не пересекала отрицательный электрод более одного раза.
- в) Необходимо также принять меры по защите высоковольтного изолятора от корпускулярного, мягкого рентгеновского и ультрафиолетового излучений.
- г) Силовая линия, выходящая из отрицательного электрода, не должна проходить через вакуумную поверхность изолятора.

Кроме того, при разработке, изготовлении и сборке электродной системы необходимо также выполнить все технические требования, предъявляемые к высоковольтным и высоковакуумным системам [2,3,4].

2. Выбор основных параметров системы

Основные параметры электродной системы определялись в основном исходя из обсуждавшихся выше физических и технических требований к системе; они связаны также с конструкцией и параметрами магнитной и вакуумной систем.

Требование получения максимальных U и $E(z)$ приводит к необходимости секционирования высоковольтной системы на максимальное число элементов, а также к уменьшению зазора между электродами и толщины стенки электрода. Толщина стенки электродов по технологическим соображениям была выбрана 1,0 мм (условие сварки, изготовления, жесткости и т.д.). Величина кольцевого зазора

между электродами Δ должна быть не более $2\rho_i$ ($\Delta < 2\rho_i$), где ρ_i — ларморовский радиус. Ларморовский радиус может быть найден из уравнения движения частицы в скрещенных электрическом и магнитном полях [5].

$$y = \frac{cE}{\omega H} (1 - \cos \omega t), \quad \text{где} \quad \omega = \frac{eH}{mc}$$

После преобразования получаем

$$\rho_i = \frac{1,02 \cdot 10^4 E}{H^2} \text{ (см)},$$

где E — напряженность электрического поля в В/см, H — напряженность магнитного поля в Э.

Для $E = 100$ кВ/см и $H = 72$ кЭ (проектные параметры установки ПСП-2) получаем $\rho_i \approx 2$ мм.

Отсюда величина межэлектродного зазора была выбрана $\Delta = 4$ мм. Уменьшение величины Δ приводит к возрастанию E в зазоре при заданном потенциале на плазме и радиальном размере слоя плазмы а также к усложнению изготовления. Для достижения напряженности электрического поля $E \approx 100$ кВ/см при выбранном межэлектродном зазоре $\Delta = 4$ мм напряжение на отдельной ячейке должно быть порядка 40 кВ. Проведенные эксперименты показали возможность получения устойчивого напряжения 40-60 кВ в вакууме на зазоре 4 мм при условии защиты поверхности изоляторов от попадания на них заряженных частиц, как исходящих из плазмы, так и образующихся в результате электрических пробоев между электродами. Полное напряжение на электродах определялось условиями эксперимента и было выбрано порядка 1 МВ. Число электродов определяется с одной стороны напряжением отдельной ячейки и полным напряжением и, с другой стороны, оптимальным отношением ширины слоя плазмы a к радиусу ловушки Z_0 (см. 35 в [1] и рис.1.). Отсюда число электродов получилось равным 25.

Толщина изолятора отдельной секции была определена

предварительными экспериментами на отдельной ячейке (см. п. 4) и равна 32 мм.

Геометрические размеры электродной системы в основном определялись геометрическими параметрами вакуумной и магнитной систем и из условий электрической и механической прочности. Основные параметры электродной системы приведены ниже:

1. Количество коаксиальных электродов - 25
2. Толщина стенки кольцевого электрода - 1 мм
3. Минимальный межэлектродный зазор в вакууме - 4 мм
4. Максимальный диаметр электрода - 1100 мм
5. Максимальный диаметр электрода в пробке - 720 мм
6. Максимальная длина электрода - 975 мм
7. Длина электродной системы - 2000 мм
8. Минимальный диаметр электрода в пробке - 480 мм
9. Межэлектродный зазор между соединительными трубами в элегазе - 10 мм
10. Толщина изоляторов - 32 мм
11. Рабочий вакуум - $10^{-6} + 10^{-7}$ мм.рт.ст.
12. Давление элегаза - 5 атм
13. Полное напряжение на электродах
рабочее - $1 \cdot 10^6$ В
тренировочное - $1,5 \cdot 10^6$ В.
14. Вес электродной системы 1500 кг.

3. Конструкция системы

Как известно, максимальное напряжение на зазоре Δ растет не линейно с увеличением Δ , а медленнее. $U_{max} \sim \Delta^{\nu}$, где $\nu = 0,5-0,8$ [2]. Поэтому в описываемой конструкции высоковольтная система (полный потенциал $U = 10^6$ В в рабочем режиме и $1,5 \cdot 10^6$ В в тренировочном режиме) секционирована на отдельные независимые высоковольтные ячейки, что позволяет свести к минимуму "эффект полного напряжения". Независимость отдельных ячеек реализована выбором конструкции, в которой каждый элемент, связанный с соответствующим электродом,

полностью охватывает предыдущий элемент на участке от области, контактирующей с плазмой, до высоковольтного выпрямителя (рис. 2).

Конструктивно электродная система состоит из 25 коаксиальных кольцевых электродов и многосекционного проходного высоковольтного изолятора (рис. 2). Так как коаксиальные электроды должны находиться в вакуумном объеме плазменной ловушки, то проходной изолятор со стороны соединения электродов (вакуумная сторона) выполнен вакуумноплотным. Со стороны подвода напряжения от выпрямителя (газовая сторона) проходной изолятор выполнен не герметичным, так как наружная и внутренняя его поверхности находятся в элегазе SF_6 под одним и тем же давлением (~ 5 атм). Применение элегаза обусловлено необходимостью повышения электрической прочности с "невакуумной" стороны.

Многосекционный высоковольтный проходной изолятор состоит из несущего фланца 5, изготовленного из алюминиевого сплава АК8, в котором также выполнены отверстия для входа элегаза, и являющегося базовым и силовым прибором плазменной ловушки. С вакуумной стороны к несущему фланцу примыкает секционированный вакуумный конус, отделяющий вакуумный объем от элегаза и являющийся несущим для электродов. Секционированный вакуумный конус состоит из 25 типоразмеров тарелок 2, изготовленных из алюминиевого сплава Д16Т, такого же числа типоразмеров изоляторов 3 из органического стекла и уплотнителей 4 из вакуумной резины. Форма тарелок 2 обусловлена расчетной жесткостью и необходимостью защиты изоляторов от попадания на них заряженных частиц. С газовой стороны образован такой же секционированный, но не герметичный конус, состоящий тоже из 25 типоразмеров потенциальных колец 7 из алюминиевого сплава Д16Т и изоляторов 8, выполненных из эпоксидного стекла (стеклоткань, пропитанная эпоксидным компаундом под давлением с предварительным вакуумированием). От высоковольтного секционированного выпрямителя напряжение подается к потенциальным кольцам 7 и далее к электродам 1 по коаксиальным трубам 6, изготовлен-

ным из листовой нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной 1 мм, и по тарелкам 2.

Механическая прочность и вакуумная плотность проходного изолятора обеспечиваются единой стяжкой 9, с помощью которой создается необходимое усилие стягивания обоих конусов (вакуумного и газового). Расчет необходимого усилия стягивания производится из условия "нераскрытия стыков" под собственным весом (рабочее положение изолятора - горизонтальное) и при заполнении внутренней полости изолятора элегазом под давлением 5 атм. При сборке изолятора тарированным ключом развивается усилие на стяжку ~ 25 тонн, которое возрастает до 28 тонн при заполнении внутренней полости изолятора элегазом.

Для охлаждения изоляторов и электродов осуществляется принудительная циркуляция элегаза, который в свою очередь охлаждается в специальном теплообменнике. Теплообменник и вентилятор вынесены за пределы электродной системы и вместе с подсоединительными трубами образуют с внутренней полостью изолятора замкнутую систему. Элегаз подается через входное отверстие в несущем фланце 5, проходит по многочисленным отверстиям в тарелках (охлаждая их при этом) и возвращается к выходному отверстию через кольцевую щель между стяжкой и наименьшей соединительной трубой 6. Для уменьшения эффекта полного напряжения отверстия в тарелках развернуты друг относительно друга. Замкнутая система охлаждения элегазом позволяет снимать тепло с электродов при тепловой мощности, выделяемой плазмой на электродах до 10 кВт.

Коаксиальные кольцевые электроды 1 устанавливаются на соответствующие посадочные диаметры тарелок проходного изолятора и фиксируются с помощью кулачков 13. Форма электродов была выбрана в соответствии с конфигурацией магнитного поля и обусловлена также необходимостью исключения электрических пробоев вблизи изоляторов. Силовые линии магнитного поля пересекают электроды под малыми углами, причем в пробочной области этот угол близок к 0, а по мере удаления от нее угол возрастает до нескольких градусов. С целью исключения электрических

пробоев вблизи изоляторов расстояние между электродами равно 4 мм только в пробочной области на длине порядка 80 мм, а далее плавно увеличивается до 12-15 мм.

Фиксация электродов осуществляется следующим образом: в тарелках равномерно по окружности выполнены от 4 до 8 карманов, куда вкладываются кулачки таким образом, чтобы они не выступали за посадочный диаметр. Далее на тарелку устанавливается соответствующий электрод, в шпангоуте которого выполнена кольцевая канавка. Поворачивая кулачок (для доступа к кулачку с одной стороны кармана выполнено отверстие, см.1 рис.2), он заходит одной стороной, имеющей скос (угол скоса меньше угла трения) в канавку шпангоута и прижимает, таким образом, электрод к тарелке.

Такая конструкция позволяет фиксировать электрод относительно тарелки в любом угловом положении, что необходимо для юстировки электродов друг относительно друга и, кроме того, отсутствуют какие-либо выступающие элементы (винты, гайки и пр.), что весьма существенно для высоковольтных конструкций. При создании конструкции электродной системы имелось в виду, что, при необходимости, изоляторы из оргстекла могут быть заменены на керамические, а уплотнители из вакуумной резины - на металлические (индий, золото). Таким образом, в дальнейшем можно исключить попадание органических соединений от электродной системы в рабочий объем ловушки.

При сборке описанной конструкции возникает ряд особенностей, которые будут рассмотрены ниже.

4. Эксперименты по моделированию элементов электродной системы

Так как конструкция электродной системы состоит из многих независимых отдельных высоковольтных ячеек, то автором совместно с В.Е.Пальчиковым были проведены предварительные исследования отдельной ячейки с параметрами, близкими к параметрам электродной системы.

Высоковольтная ячейка состоит из двух коаксиальных электродов, ось которых совпадает с осью симметрии магнитного поля; общий вид ее схематично показан на рис.3.

Условно ячейку можно разделить на 3 элемента: участок, контактирующий с плазмой (1), здесь магнитные силовые линии практически параллельны электродам; переходной участок (II), где расстояние между электродами плавно возрастает и магнитные силовые линии под малым углом входят в положительный электрод, и область изолятора (III), здесь расстояние между электродами определяется из условия, что напряженность электрического поля $E \leq 20$ кВ/см на поверхности изолятора и изолятор защищен от прямого попадания ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения за счет поворота электродов.

Эксперименты проводились на электродах, выполненных из нержавеющей стали 12x18H10T толщиной 1 мм; расстояние между электродами на участке 1 было равно 4 мм; магнитное поле 10 кГс; расстояние между электродами вдоль силовой линии магнитного поля не менее 40 мм (участок II) и по поверхности изолятора - 32 мм.

Была достигнута напряженность электрического поля 150 кВ/см (при одном промежутке $U = 60$ кВ) при плотности ионных потоков, падающих на электрод порядка 10^{-6} А/см² и 100 кВ/см ($U = 40$ кВ) при ионных потоках порядка 10^{-4} А/см².

Известно, что напряжение поверхностного пробоя очень чувствительно к конфигурации и качеству поверхности изолятора вблизи катода и конфигурации катода в этом месте [2]. Поэтому были проведены также эксперименты с различной конфигурацией поверхности изолятора. С учетом удобства изготовления и конструктивных соображений была выбрана форма изолятора с наружной конической поверхностью с целью увеличения угла между силовой линией магнитного поля и образующей изолятора, что способствует увеличению напряжения поверхностного пробоя.

5. Конструкция и технология изготовления электродов

В ловушке с вращающейся плазмой контакт между системой, создающей высоковольтный потенциал, и плазмой осуществляется с помощью специальных коаксиальных электродов. Как отмечалось выше, форма этих электродов должна быть близка к форме магнитных поверхностей в рабочем объеме ловушки.

Каждый из 25 электродов (один из электродов указан на рис.4) состоит из обечайки 1, представляющей собой тонкостенную оболочку двойной кривизны, и шпангоута 2. Обе обечайки и шпангоуты изготовлены из нержавеющей стали 12x18H10T и сварены между собой встык аргонодуговой сваркой. Приведем краткое описание геометрии электродов. Электрод № 1 (наибольший) имеет цилиндрическую часть с внутренним диаметром $\varnothing 720$ мм на длине 80 мм; обжимную часть на длине 240 мм, на которой диаметр постепенно (но не линейно) увеличивается и достигает значения порядка $\varnothing 780$ мм и коническую часть с углом конуса 14° и диаметром у основания 1100 мм; полная длина электрода ~ 975 мм. У всех последующих электродов диаметр цилиндрической части уменьшается на 10 мм по сравнению с предыдущим; конусность также уменьшается до 0° у электрода № 15 и далее изменяется в противоположную сторону (до $24^\circ 12'$ у электрода № 25). Уменьшается и длина каждого электрода (до 124 мм у электрода № 25). Напомним, что форма электродов определялась также требованиями, приведенными в п.3, а выбор толщины стенки электрода и межэлектродного зазора обоснован в п.2.

Наибольшую сложность представляет собой изготовление высокоточной тонкостенной обечайки.

В литературе [например, 6-10] описаны некоторые методы изготовления высокоточных оболочек, основным из которых является метод ротационного выдавливания. Однако, анализ геометрии всех 25 типоразмеров обечаек показал, что подобным методом их изготовление нецелесообразно.

но в связи прежде всего с тем, что большинство обечаек имеет малую конусность, и поэтому их необходимо изготавливать за несколько переходов, т.е. для одного типоразмера потребуется несколько оправок, а также в связи с ограниченным количеством отечественного оборудования для ротационного выдавливания (особенно больших размеров).

В результате исследования и экспериментов была разработана и освоена технология изготовления обечаек растяжением разжимными пуансонами предварительно сваренных листовых конических (или цилиндрических) заготовок на прессе ПКД-1М. В разработке технологических процессов участвовал Научно-исследовательский институт технологии и организации производства (НИАТ), г.Москва.

Технология изготовления электродов состоит из следующих основных операций.

1. Сваривались конические (или цилиндрические, для электродов с малой конусностью) заготовки из листовой стали 12х18Н10Т толщиной 1 мм с учетом принятого процента растяжения $\epsilon_{max} = 20\%$.
2. Заготовки подвергались растяжению разжимными пуансонами на прессе ПКД-1М. Под действием напряжений, возникающих в заготовке при разжатии секторов пуансона, заготовка пластически деформируется и принимает форму поверхности, образуемой секторами пуансона. На окончательную калибровку оставлялось $\sim 2\%$ общей деформации.
3. Производилась термообработка (отжиг при $t \approx 1000^\circ\text{C}$) с целью снятия остаточных напряжений и получения одинакового процента пружинения (упругая деформация) после калибровки.
4. Калибровка проводилась на уже упомянутом прессе ПКД-1М. При калибровке ставилась задача получения диаметра с заданной точностью лишь на цилиндрической части обечайки, где величина межэлектродного зазора минимальна, а диаметр второго торца обечайки получался факультативно, и по фактическому его размеру изготов-

ливался соответствующий шпангоут. Таким образом, удалось достичь точности диаметров обечайки на цилиндрической части $\pm 0,2$ мм; отклонения диаметров обечаек на втором торце составляли $\pm 0,5$ мм, что допустимо, так как межэлектродный зазор здесь значительно больше.

5. После подрезки торцев к каждой обечайке приваривался соответствующий шпангоут, используя при этом специальную оснастку.
6. Поверхности электродов подвергались электрохимическому полированию, так как они являются высоковольтными и находятся в вакууме $10^{-6} \pm 10^{-7}$ мм рт.ст.

Для растяжения и калибровки обечаек был спроектирован и изготовлен разжимной пуансон, состоящий из 18 чугунных секторов. С целью уменьшения огранки на обечайках пуансон в разжатом положении должен иметь наименьшие зазоры между секторами. Минимальный зазор определяется исходя из разности диаметров пуансона в сжатом и разжатом положениях и количества секторов и, в нашем случае, равен

6 мм. Первоначальная наружная форма пуансона в разжатом положении соответствовала форме внутренней поверхности обечайки электрода № 1. Для изготовления последующих обечаек электродов производилась переточка пуансона в разжатом положении на специальном приспособлении, которое имело такие же посадочные места под сектора как и рабочий конус прессы ПКД-1М. Переточка производилась по копирам.

Вся необходимая технологическая оснастка (разжимной секционированный пуансон, оснастка для переточки пуансона и сварки обечаек с шпангоутами, копиры и т.д.) разработана автором и изготовлена в ИЯФ СО АН СССР.

6. Технология сборки электродной системы

При сборке электродной системы производится последовательная стыковка порядка 100 элементов, и даже при условии высокой точности изготовления каждого элемента в

отдельности "набегание" погрешностей может значительно превысить допустимые значения. Основные требования к сборке сводятся к следующему:

1. Необходимо обеспечить герметичность сборки вакуумной стороны многосекционного проходного изолятора с одно-временным плотным прилеганием торцевых поверхностей изоляторов к поверхностям тарелок с целью обеспечения электрической прочности.
2. Несоосность наружных посадочных диаметров тарелок относительно посадочного диаметра несущего фланца не должна превышать 0,2 мм, что необходимо для обеспечения заданной точности межэлектродных зазоров.
3. При заполнении многосекционного проходного изолятора элегазом под давлением не должно произойти нарушения вакуумной плотности.

Первое требование выполняется за счет определенного соответствия сечений канавок под уплотнитель в изоляторах и самого уплотнителя. Во время сборки необходимо только аккуратно укладывать уплотнители в свои канавки во избежании его "закусывания".

Для реализации второго требования было разработано и изготовлено специальное приспособление, которое схематично изображено на рис.5.

Сборка всех тарелок с изоляторами и уплотнителями производится на единой оправке с 25 посадочными диаметрами, выполненными с достаточной соосностью относительно посадочного диаметра несущего фланца. При снятии собранной части многосекционного проходного изолятора с оправки соосность не должна нарушаться.

Сложность сборки заключается в том, что трудно осуществить последовательное сжатие уплотнителей, а при сборке без последовательного их сжатия, с учетом шага между тарелками и толщины несжатого уплотнителя, уже 13-ая тарелка выходит за пределы своего посадочного диаметра оправки. Поэтому приспособление выполнено из двух оправок, причем вторая оправка может перемещаться отно-

сительно первой по направляющей стойке 10. Начальное положение оправок друг относительно друга осуществляется пружинами 5.

Сборка вакуумной стороны многосекционного проходного изолятора производится следующим образом:

На основание приспособления 1 одевается несущий фланец 2 затем на оправки 3 и 9 последовательно собираются тарелки 8, изоляторы 6 и уплотнители 7. После сборки последнего изолятора устанавливается фланец 12 и через упорный подшипник 13 (для уменьшения момента трения) производится стяжка всей сборки гайкой 14.

Для уменьшения трения и исключения образования стружки при перемещении тарелок относительно оправки на все посадочные диаметры оправки, выполненной из алюминиевого сплава, надеты защитные кольца 11 из капролона, которые обрабатывались за одну установку для достижения необходимой соосности. Отсутствие зазоров между тарелками и изоляторами проверяется визуально и при помощи щупа.

Описанный способ сборки исключает "набегание" погрешностей, которое проявляется при последовательной сборке без приспособления. Затем производится проверка на отсутствие течи, для чего откачивается на вакуум внутренняя полость вакуумной стороны многосекционного проходного изолятора, а обдув гелием производится снаружи между тарелками. В случае отсутствия течи сборка фиксируется наружным кожухом 4, снимается с оправки и устанавливается на специальный кантователь, где производится дальнейшая сборка всего многосекционного проходного изолятора.

Устанавливается стяжка 9 (рис.2.), производится последовательная сборка изоляторов 8, колец 7, соединительных труб 6 и на стяжку навинчивается гайка 11 до соприкосновения с кольцом 12, в котором выполнены отверстия для выхода элегаза. Требуемое усилие на стяжке (~25 тонн) обеспечивается равномерным завинчиванием упорных болтов 10 тарированным ключом. После этого снимается наружный кожух 4 (рис.5) и производится сборка электродов.

Сборка электродов начинается с электрода № 15 (счет ведется от большего к меньшему), который устанавливается на посадочное место соответствующей тарелки и, как было указано ранее, фиксируется с помощью кулачков 13 (рис.2). Путем поворота вокруг своей оси и посредством специального контрольного приспособления данный электрод устанавливается соосно с посадочным диаметром несущего фланца 5 (рис.2). Последующие электроды устанавливаются подобным же образом, но при этом контролируется межэлектродный зазор.

7. Результаты контроля и испытаний

Сборка вакуумной части многосекционного проходного изолятора без уплотнителей показала хорошее соответствие фактических точностей с расчетными. Несоосность наружных посадочных диаметров тарелок относительно посадочного диаметра несущего фланца не превышала 0,1 мм. После фиксации сборки наружным кожухом она легко снимается с оправки, что свидетельствует об отсутствии перекосов и смещений тарелок.

При сборке с уплотнителями эта точность несколько ухудшается. По-видимому при одновременном сжатии 50 уплотнителей из вакуумной резины появляются радиальные усилия, которые прижимают тарелки к оправкам в различных точках по азимуту на всей длине, что подтверждается некоторым "закусыванием" оправки.

Фактическое колебание межэлектродного зазора составляет $\pm 0,4$ мм и складывается это колебание из некруглости самих электродов и несоосности посадочных диаметров тарелок относительно диаметра несущего фланца.

В дальнейшем представляется возможным уменьшение колебания межэлектродного зазора до $\pm 0,2$ мм за счет достижения расчетных несоосностей наружных диаметров тарелок путем более тщательной сборки вакуумной части изолятора с уплотнителями.

В заключение автор выражает благодарность В.И.Волосову и В.Е.Пальчикову за участие в обсуждениях и экспериментальных исследованиях.

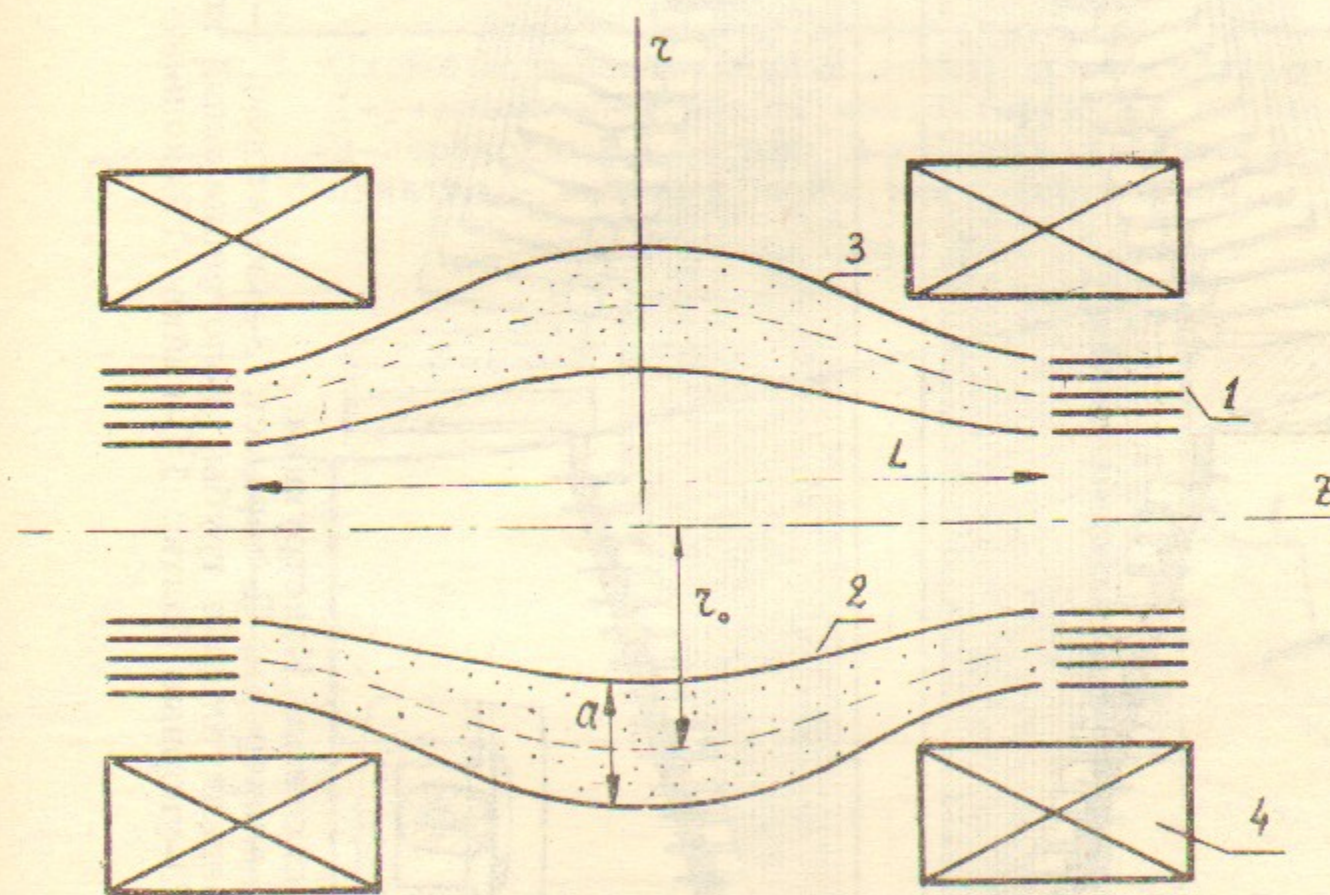


Рис.1. Схема ловушки с вращающейся плазмой.

1 - кольцевые электроды; 2 - внутренний лайнер; 3 - наружный лайнер; 4 - катушки магнитного поля; пунктир - магнитные силовые линии

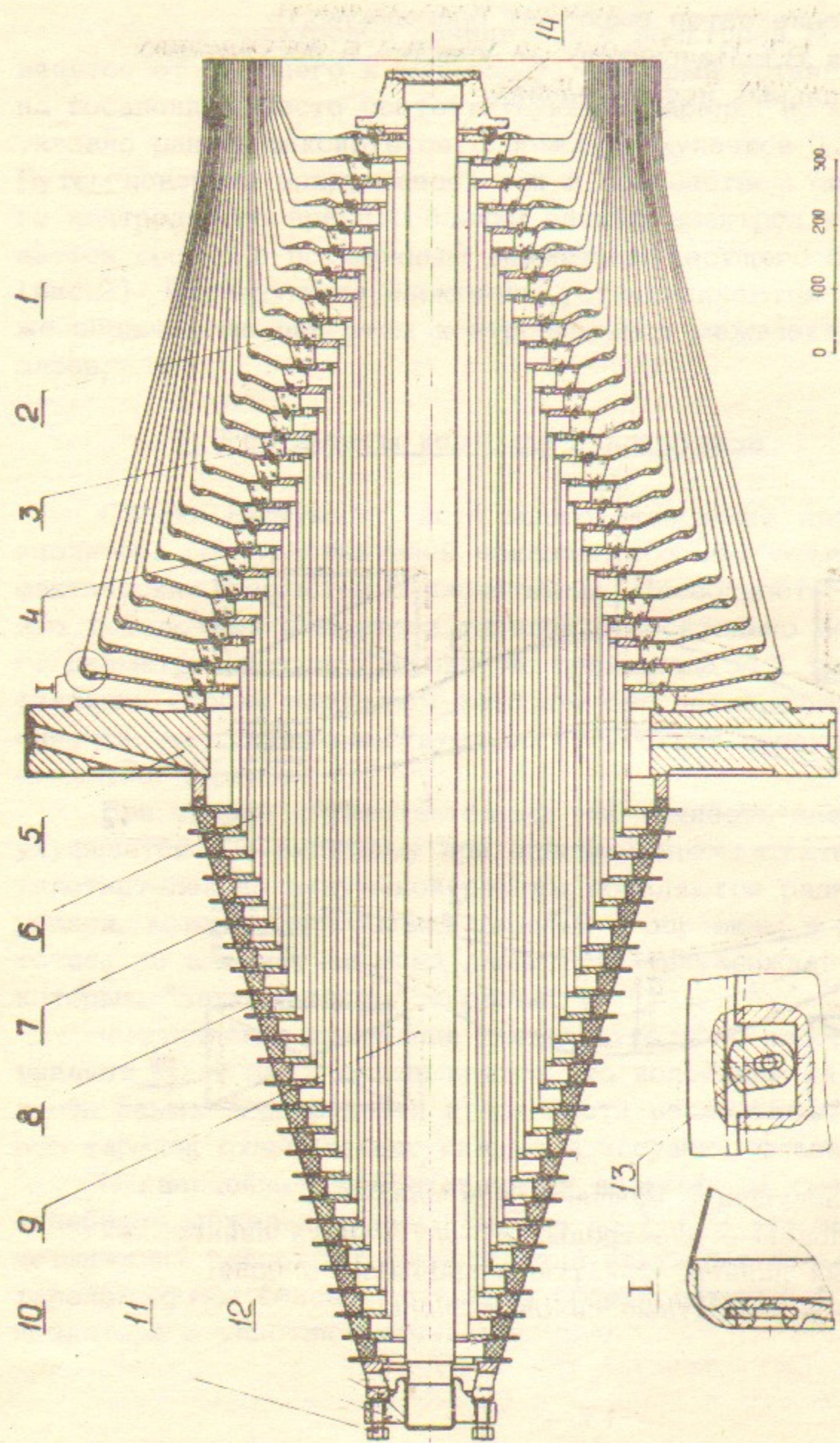


Рис.2. Электродная система. Конструкция.
 1-кольцевые электроды; 2-тарелки; 3-изоляторы; 4-уплотнители; 5-несущий фланец; 6-соединительные трубы; 7-потенциальные кольца; 8-изоляторы; 9-стяжка; 10-упорные болты; 11-гайка; 12-кольцо; 13-кулачки; 14-фланец.

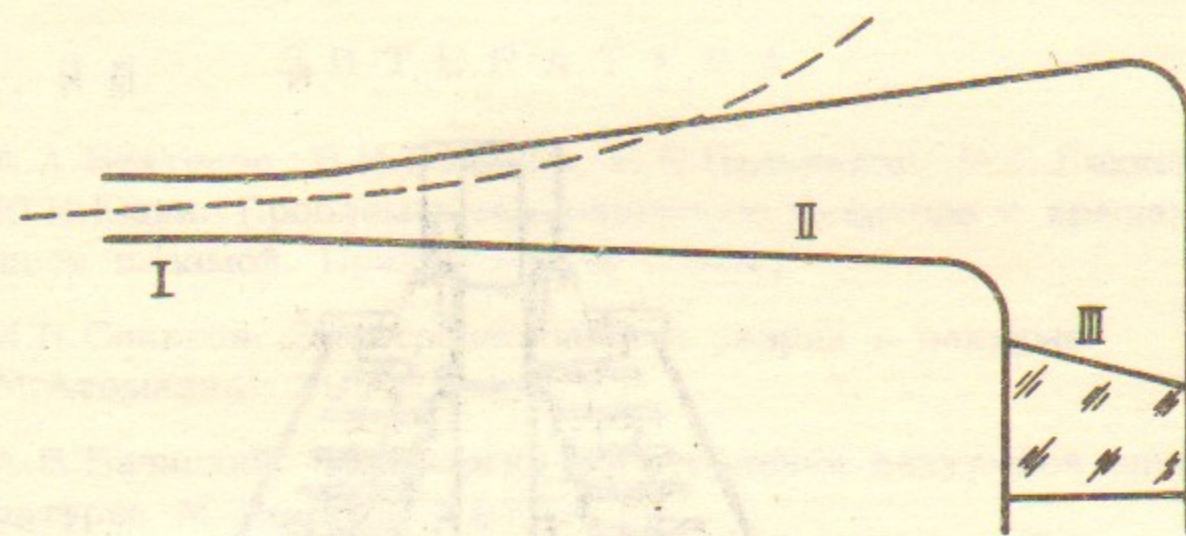


Рис.3. Схема отдельной ячейки электродной системы.
 1-участок электродов, контактирующих с плазмой;
 2-переходный участок; 3-область изолятора;
 пунктир - силовые линии магнитного поля.

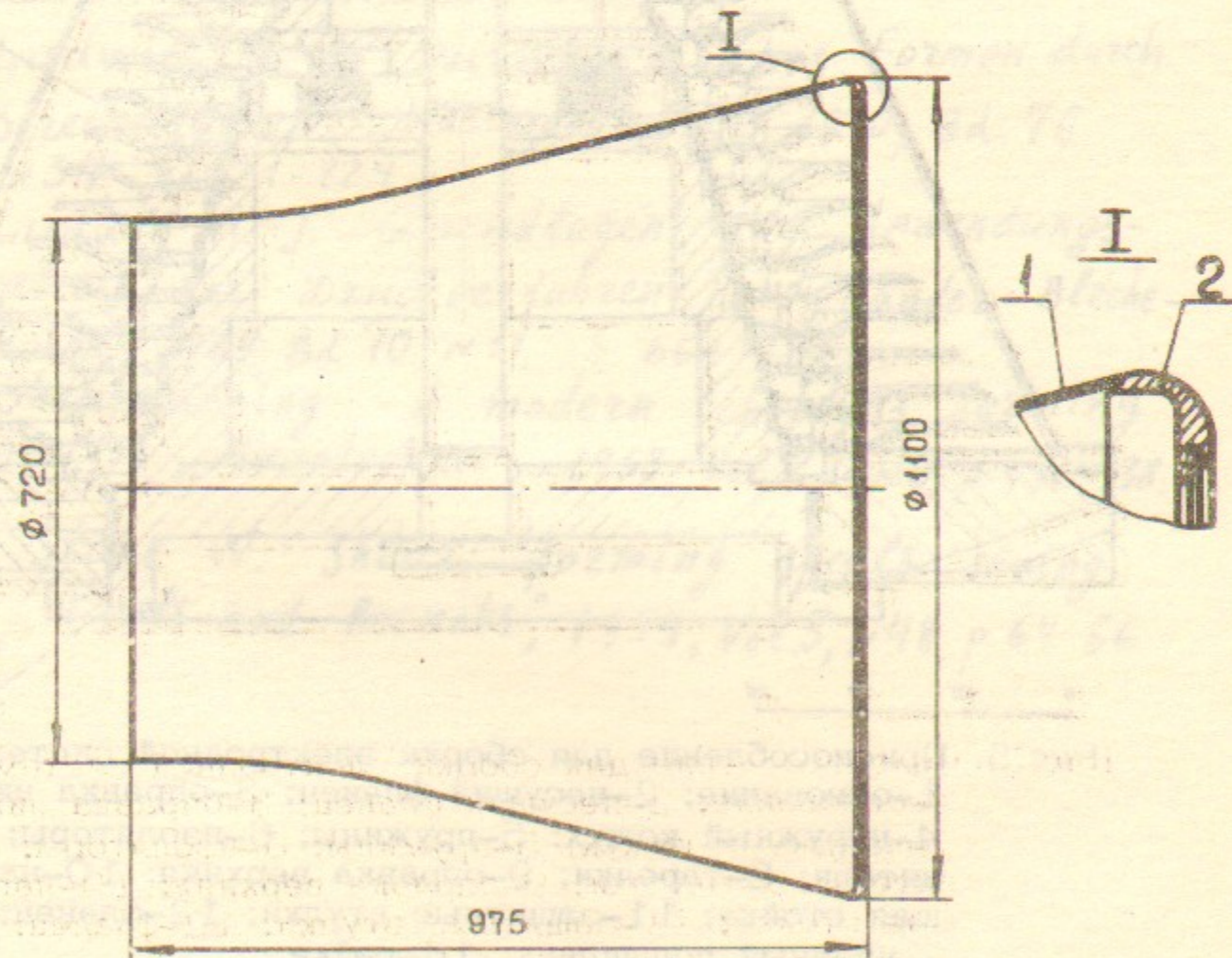


Рис.4. Электрод.
 1 - обечайка; 2 - шпангоут.

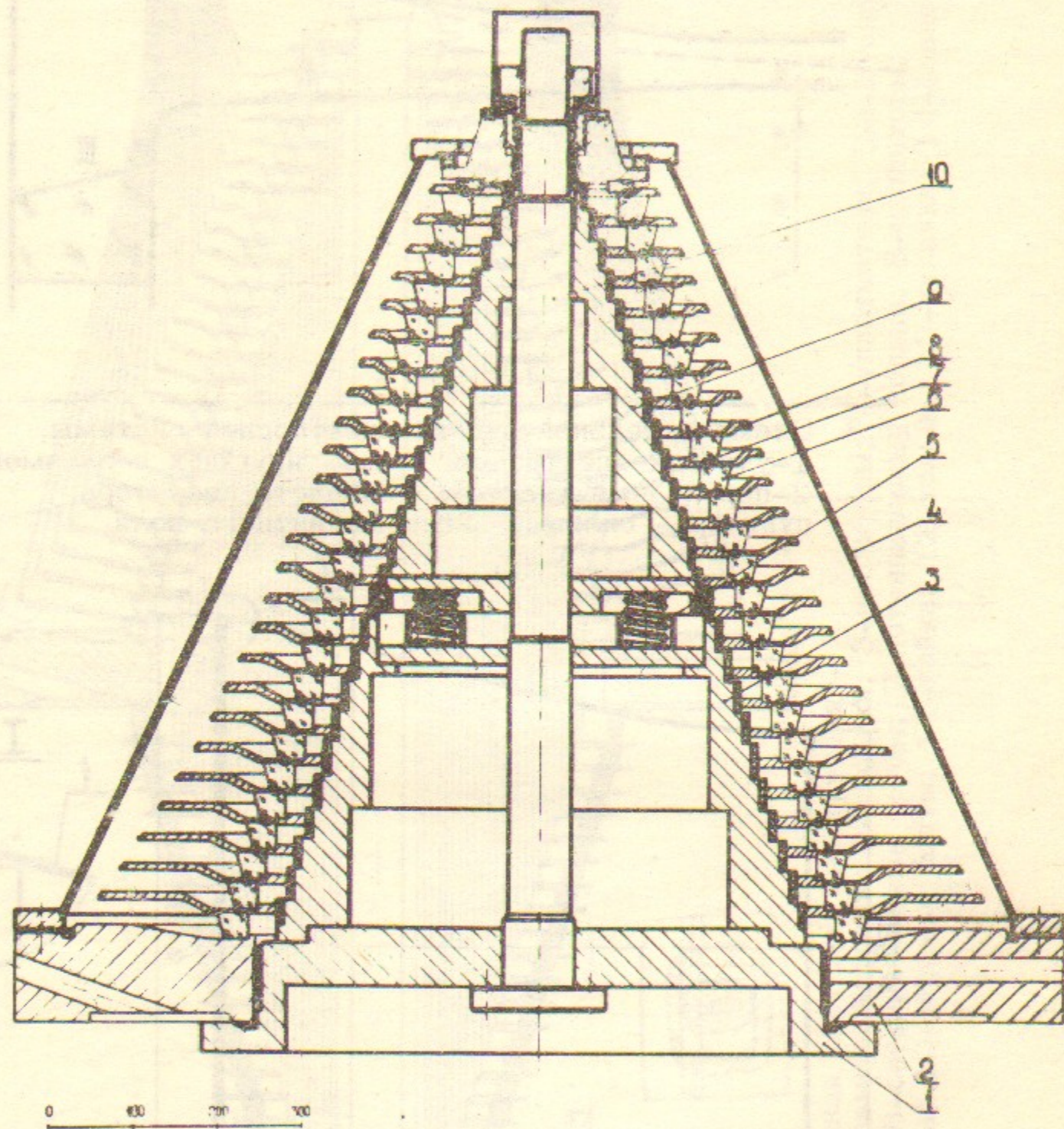


Рис. 5. Приспособление для сборки электродной системы.
 1—основание; 2—несущий фланец; 3—оправка нижняя;
 4—наружный кожух; 5—пружины; 6—изоляторы; 7—уплотнители;
 8—тарелки; 9—оправка верхняя; 10—направляющая стойка;
 11—защитные втулки; 12—фланец; 13—упорный подшипник;
 14—гайка.

1. А.А.Бехтенов, В.И.Волосов, В.Е.Пальчиков, М.С.Пеккер, Ю.Н.Юдин. Проблемы термоядерного реактора с вращающейся плазмой. Препринт ИЯФ 79-41.
2. И.Н.Сливков. Электроизоляция и разряд в вакууме. М.Атомиздат 1972.
3. А.В.Балицкий. Технология изготовления вакуумной аппаратуры. М.Энергия, 1974.
4. А.И.Полтев. Конструкции и расчет элегазовых аппаратов высокого напряжения. Л. "Энергия", 1979.
5. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Теория поля. М.Наука, 1967.
6. М.А.Гредитор. Давильные работы и ротационное выдавливание. М.Машиностроение, 1971.
7. Ludwig H.-J. Wirtschaftliches Formen durch Streckdrücken. "Maschinenmarkt", 1970, Bd. 76, №34, S. 721-724.
8. Ludwig H.-J. Grundlagen und Anwendungsgebiete der Drückverfahren. III. "Bänder-Bleche-Rohre" 1969, Bd 10, №11, S. 667-676.
9. Shear spinning. A modern chipless forming process. "Microtechnic", 1968, Vol. 22, №6, p. 432-438.
10. Stone W. Shear forming speeds saving. "Missels and Rockets", 1959, Vol. 5, №48, p. 64-66.