



ООО  
Прикладная  
Электроника

## **РУКОВОДСТВО ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ**



**МАГNETРОННАЯ РАСПЫЛИТЕЛЬНАЯ  
СИСТЕМА С ФЛАНЦЕВЫМ КРЕПЛЕНИЕМ  
И ПЛАВНОЙ РЕГУЛИРОВКОЙ СТЕПЕНИ  
НЕСБАЛАНСИРОВАННОСТИ  
APEL-MRE-95/100**

**ТОМСК 2013**



## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ .....	3
2. НАЗНАЧЕНИЕ .....	3
3. СОСТАВ МРС .....	3
3. НАЗНАЧЕНИЕ И ПРИНЦИП РАБОТЫ МРС .....	3
4. КОНСТРУКЦИЯ И ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ МРС APEL-MRE-95/100 .....	5
4. СПЕЦИФИКАЦИЯ МРС APEL-MRE-95/100.....	6
5. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МРС .....	6
6. УСТАНОВКА НА ВАКУУМНУЮ КАМЕРУ .....	12
7. ПОДКЛЮЧЕНИЕ МРС .....	15
8. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ. ....	15
9. СБОРКА И РАЗБОРКА МАГНЕТРОНА.....	16
10. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ И МЕРЫ ПРЕДОСТОРОЖНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С МАГНЕТРОНОМ.....	19



## 1. ВВЕДЕНИЕ

Благодарим Вас за покупку магнетронной распылительной системы серии **APEL-MRE-95/100!**

Торговая марка. Все торговые марки APEL являются законной собственностью их владельцев.

Авторское право. Данная инструкция и все содержащаяся в ней информация защищены авторским правом.

Настоящее руководство пользователя предназначено для ознакомления с магнетронной распылительной системой (в дальнейшем MPC) и устанавливает правила эксплуатации, соблюдение которых обеспечивает её поддержание в постоянной готовности к действию.

## 2. НАЗНАЧЕНИЕ

MPC **APEL-MRE-95/100** предназначена для распыления проводящих мишеней в процессах вакуумного нанесения тонкопленочных покрытий.

MPC может эксплуатироваться в составе вакуумных напылительных установок, а также в научных целях при исследовании вакуумных разрядов.

## 3. СОСТАВ MPC

В состав комплекта MPC входит:

- MPC **APEL-MRE-95/100**;
- руководство пользователя;
- источник питания для электромагнитной катушки (опционно);
- источник питания серии APEL-M (опционо)

## 3. НАЗНАЧЕНИЕ И ПРИНЦИП РАБОТЫ MPC

Магнетронные распылительные системы являются высокоэффективными устройствами для нанесения покрытий из металлов (Ti, Zr, Cr, Al, Cu, Au, Ag и др.), сплавов, оксидов и нитридов методом магнетронного распыления на постоянном или импульсном токе.

Упрощенная схема магнетронной распылительной системы планарного типа с круглым катодом представлена на рис. 1. Магнетронный разряд зажигается между катодом 1 и анодом 9, которым также обычно являются заземленные стенки вакуумной камеры. Питание разряда осуществляется от источника постоянного либо импульсного напряжения ИП. Образующиеся в разряде ионы ускоряются в катодном падении потенциала и бомбардируют катод из напыляемого материала, в результате чего происходит распыление его поверхности и формирование потока распыленных атомов в сторону подложки. Электроны, эмитируемые с мишени под действием бомбардировки, захватываются магнитным полем и совершают сложное циклоидальное движение по замкнутым траекториям в скрещенных электрическом и магнитном полях. Двигаясь в магнитной ловушке у поверхности катода, электрон успевает многократно ионизовать атомы рабочего газа, прежде чем потеряет большую часть энергии и достигнет анода.

За счет локализации плазмы, у поверхности катода достигается высокая плотность ионного тока (на два порядка выше, чем в обычных диодных системах распыления) и большая удельная мощность, рассеиваемая на мишени. Увеличение скорости распыления с одновременным снижением рабочего давления позволяет значительно снизить загрязнения пленок посторонними включениями. Локализация электронов вблизи мишени предотвращает бомбардировку ими подложек, что снижает температуру и радиационные дефекты в создаваемых структурах. Главными достоинствами магнетронных распылительных систем являются относительно высокие скорости осаждения и возможность получения равномерных по толщине пленок на подложках большой площади.

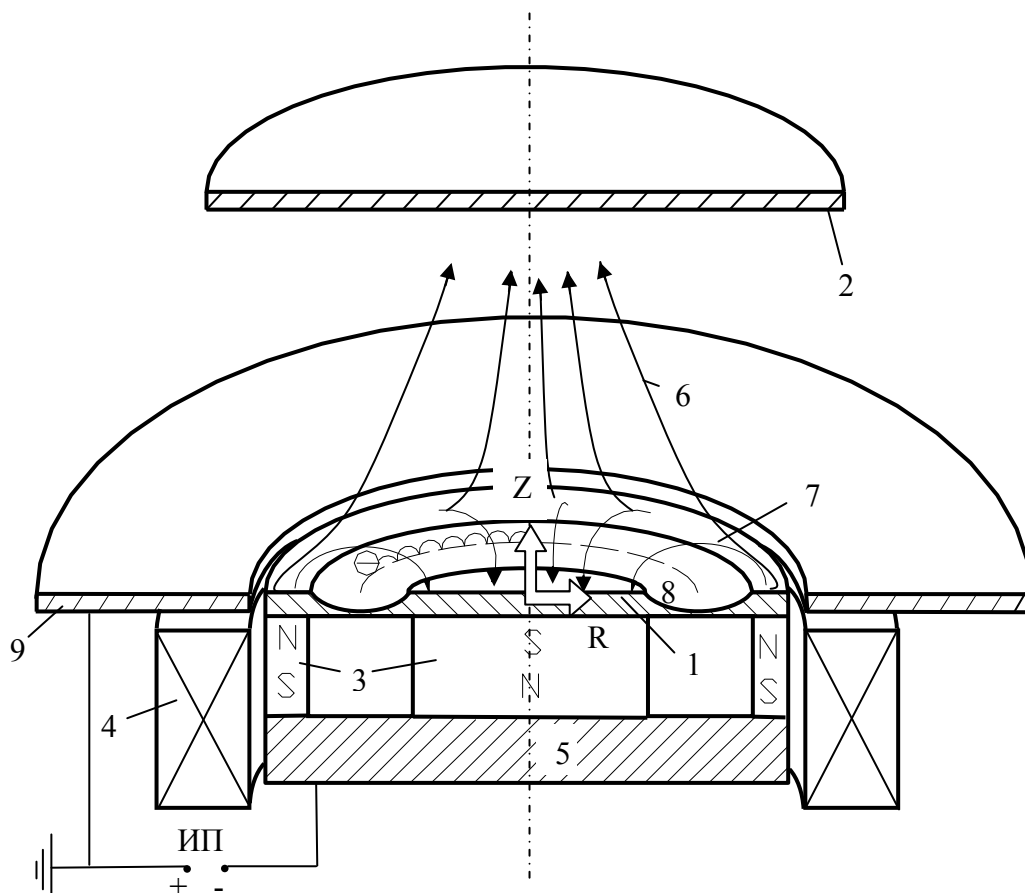


Рис. 1. Упрощенная схема магнетронной распылительной системы.

1 – распыляемый катод, 2 – подложка, 3 – постоянные магниты, 4 – электромагнит, 5 – магнитопровод, 6 – несбалансированные линии магнитного поля, 7 – сбалансированные линии магнитного поля, 8 – зона распыления катода, 9 – анод (крепежный фланец), ИП – источник питания магнетрона.

Однако существует ряд покрытий, свойства которых могут быть значительно улучшены в результате ионного воздействия на их поверхность в процессе осаждения. В результате локализации плазмы магнитным полем у поверхности катода в «обычных» или «сбалансированных» магнетронных распылительных системах область плотной плазмы простирается не более чем на 50 мм от катода и плотность ионного тока на подложки находящиеся на большем расстоянии обычно много меньше  $1 \text{ mA/cm}^2$ . Поэтому разработанная нами конструкция магнетрона оснащена электромагнитной катушкой для создания несбалансированной конфигурации магнитного поля над поверхностью катода. В несбалансированной конфигурации часть линий магнитного поля, создаваемых внешним полюсом магнитной системы, не замыкается на расположенный рядом центральный магнит с противоположной полярностью, а направляется в сторону подложки. В результате ослабления магнитной ловушки у поверхности катода и наличия несбалансированных линий магнитного поля часть вторичных электронов имеет возможность уходить по ним в сторону подложки и совершать там ионизацию газа.



#### 4. КОНСТРУКЦИЯ И ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ МРС АРЕL-MRE-95/100

Сборочный чертеж МРС представлен на рис. 2. Устройство состоит из следующих основных узлов: распыляемого катода 10, крепежного фланца 8 (анода) и магнитной системы. Распыляемый катод изготавливается из электрически проводящего материала, как правило, металла, наносимого на подложку. Крепежный фланец выполняется из немагнитного материала, например сплава Д16Т, для беспрепятственного прохождения несбалансированных линий магнитного поля в сторону подложки. Для того чтобы обеспечить высокое значение составляющей магнитного поля, параллельной поверхности катода в зоне распыления и иметь возможность изменять степень несбалансированности магнитного поля, используется магнитная система комбинированного типа на основе постоянных магнитов 20,21 из сплава NdFeB и электромагнитной катушки 2. Изоляция катода от крепежного фланца и других элементов конструкции осуществляется с помощью капролоновых изоляторов 3 и 4 (рис. 2). Также эти изоляторы содержат вакуумные уплотнения 12 в виде резиновых колец. По причине большой мощности выделяемой на катоде в процессе работы магнетрона катод выполнен с прямым водяным охлаждением. Вода подается к катоду через трубки 22. Система уплотняется резиновыми кольцами 13 и 14, которые разжимаются катодом 10 с помощью прижимного кольца 9.

При работе магнетронной распылительной системы в сильно несбалансированном режиме, когда поток ионов на подложку значительно превышает поток распыленных атомов, скорость травления покрытия больше скорости его нанесения. Это дает возможность проводить предварительную очистку и активацию поверхности подложек перед нанесением на них покрытия.

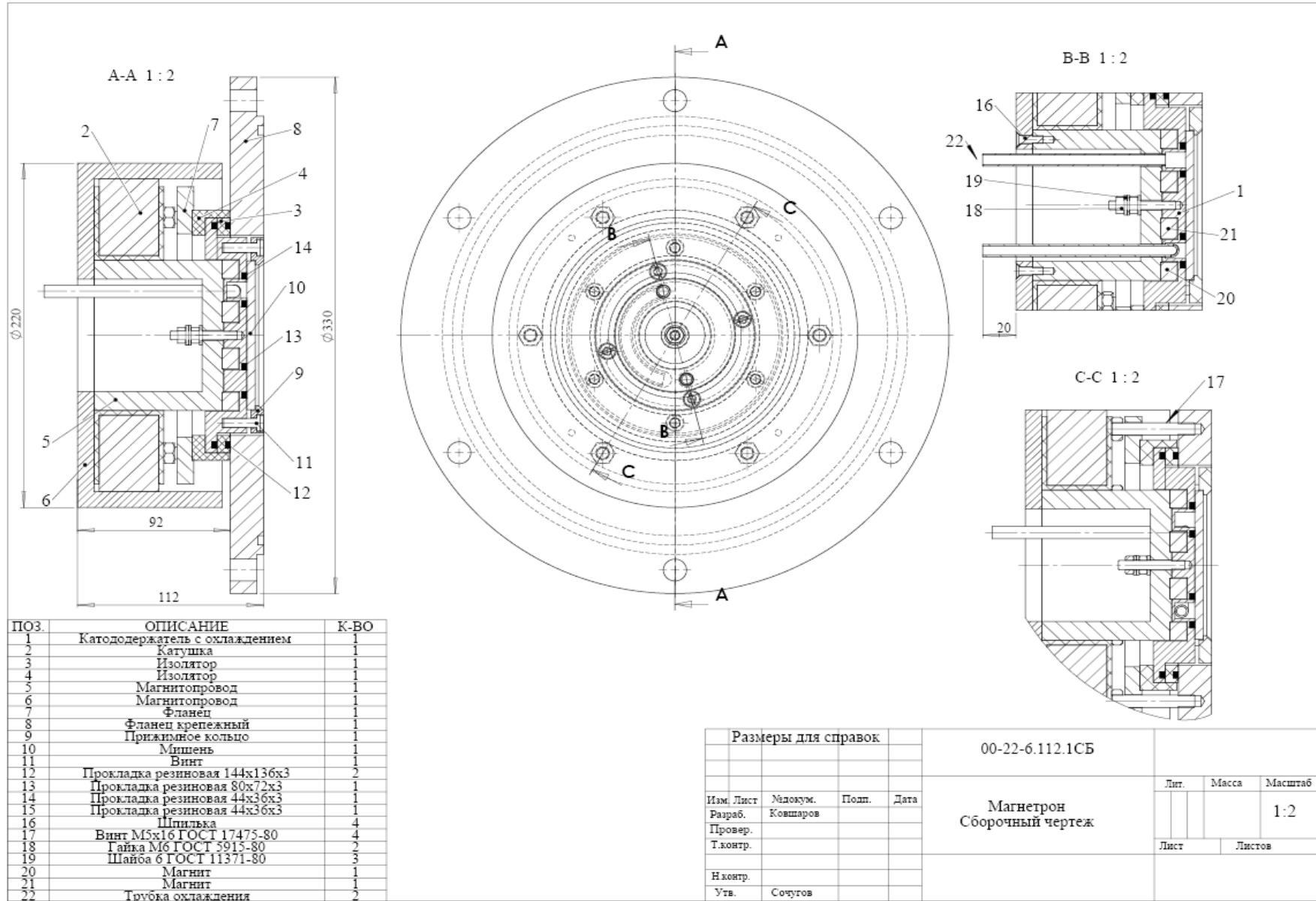


Рис. 2



#### 4. СПЕЦИФИКАЦИЯ МРС APEL-MRE-95/100

Габаритные размеры	
Диаметр крепежного фланца, мм	По согласованию
Высота магнетрона, мм	132
Вес магнетрона, кг	10 – 14 кг

Рабочие характеристики	
Диаметр катода, мм	95-100
Толщина катода, мм	до 8
Магнитная система	постоянные магниты и электромагнитная катушка
Магнитное поле на поверхности катода, Гс	350-500
Ток в электромагнитной катушке (DC), А	до 1
Тип охлаждения	Прямое
Коэффициент использования катода, %	30-40
Рабочие газы	Ar, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> и т.д.
Рабочее давление, Па	0.09-1
Мощность разряда, кВт	до 1.5 кВт
Плотность ионного тока на подложку, мА/см <sup>2</sup>	0.01-2
Отношение потока атомов к потоку ионов на подложку	0.1-1

Материалы конструкции	
Магнитопровод	Малоуглеродистая сталь
Катододержатель	Нержавеющая сталь
Фланец крепежный	Дюраль
Катод	Напыляемый материал
Изоляторы	Капролон
Магниты	NdFeB
Резиновые уплотнения	Витон, резина
Трубки для подвода охлаждения	Полиуретановая трубка
Водяное охлаждение	
Проток воды, л/мин	2
Температура воды на входе, С°	< 30

#### 5. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МРС

В зависимости от величины и направления тока в электромагнитной катушке ( $I_c$ ) могут реализовываться различные конфигурации магнитного поля. Это могут быть как сбалансированная конфигурация, так и несбалансированная (тип 1 или 2), согласно общепринятой классификации [*Unbalanced magnetrons as sources of high ion fluxes / B. Window, N. Savvides // J. Vac. Sci. Technol., A 4(3), 1986, p. 453*]. Конструкция несбалансированного магнетрона 1-го типа не получила широкого распространения, т.к. в ней несбалансированные линии магнитного поля направлены в сторону стенок камеры в результате чего плотность плазмы у подложки низкая. Поэтому для генерации ионов в области подложки наиболее подходит 2-й тип несбалансированной конфигурации магнитного поля. Данная конфигурация реализуется в том случае, когда магнитное поле соленоида совпадает по направлению с магнитным полем, создаваемым внешними магнитами магнетрона ( $I_c = 1$  А).

Внешний вид магнетронной распылительной системы представлен на рис. 3.

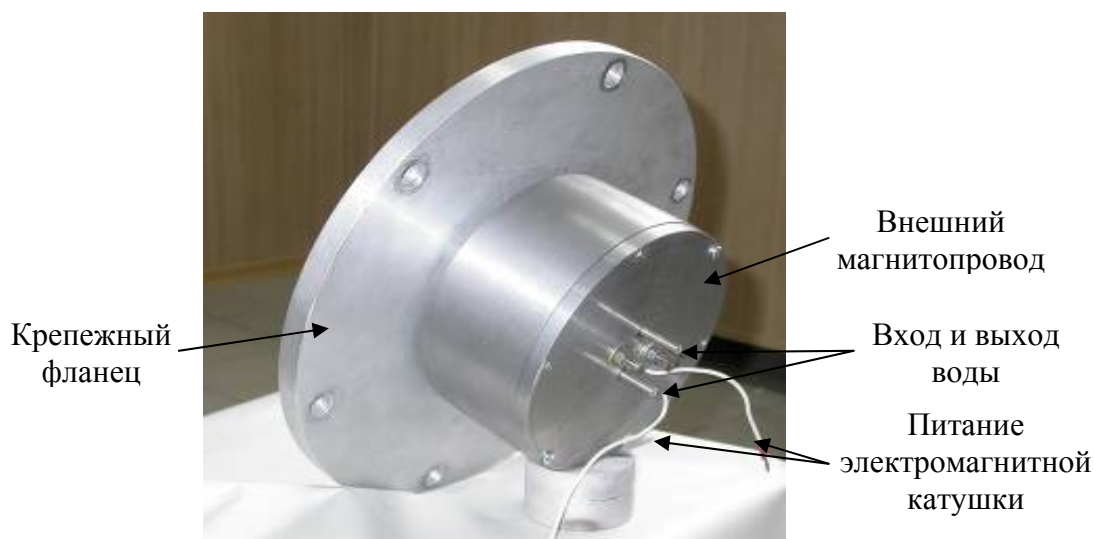


Рис. 3. Фотография магнетронной распылительной системы (Вид сзади).

Результаты измерений магнитного поля, посредством измерителя магнитной индукции РШ 1-10, над поверхностью катода приведены на рис. 4. Видно, что при изменении направления тока в катушке происходит существенное изменение конфигурации магнитного поля над поверхностью катода, сопровождающееся как уменьшением максимального значения тангенциальной составляющей магнитного поля с 750 до 550 Гс, так и уменьшением радиуса зоны распыления. Это объясняется тем, что в сильно несбалансированном режиме (тип 2) магнитная ловушка над поверхностью катода сжимается его к центру в результате чего происходит симметричное смещение зоны максимальной эрозии.

Как видно из рис. 4,б, не менее значительные изменения магнитного поля происходят в пространстве катод-подложка при изменении тока в соленоиде. В несбалансированном режиме 1-го типа ( $I_c = -1$  А) перпендикулярная составляющая магнитного поля на оси системы экспоненциально спадает до 0. При выключенной электромагнитной катушке магнетрон работает в слабо несбалансированном режиме (тип 2) с магнитным полем в пространстве катод-подложка не превышающим 20 Гс. При увеличении тока в соленоиде до 1 А степень несбалансированности силовых линий магнитного поля увеличивается, а величина поля достигает 180 Гс.

Ток магнетронного разряда зависит от многих факторов, например от рабочего напряжения, давления и рабочего газа, индукции магнитного поля, конфигурации магнетронной системы, распыляемого материала, и определяется мощностью источника питания. Одной из основных характеристик разряда является вольтамперная характеристика (ВАХ). Существенное влияние на нее оказывают рабочее давление ( $P$ ) и индукция магнитного поля ( $B$ ).

В диапазоне величин токов разряда от 0.1 А до 5.3 А напряжение горения разряда составляет 300-520 В (рис. 5). В качестве материала катода использовался титан. С уменьшением давления ВАХ сдвигаются в область больших рабочих напряжений. С ростом давления напряжение горения разряда падает (рис. 6).



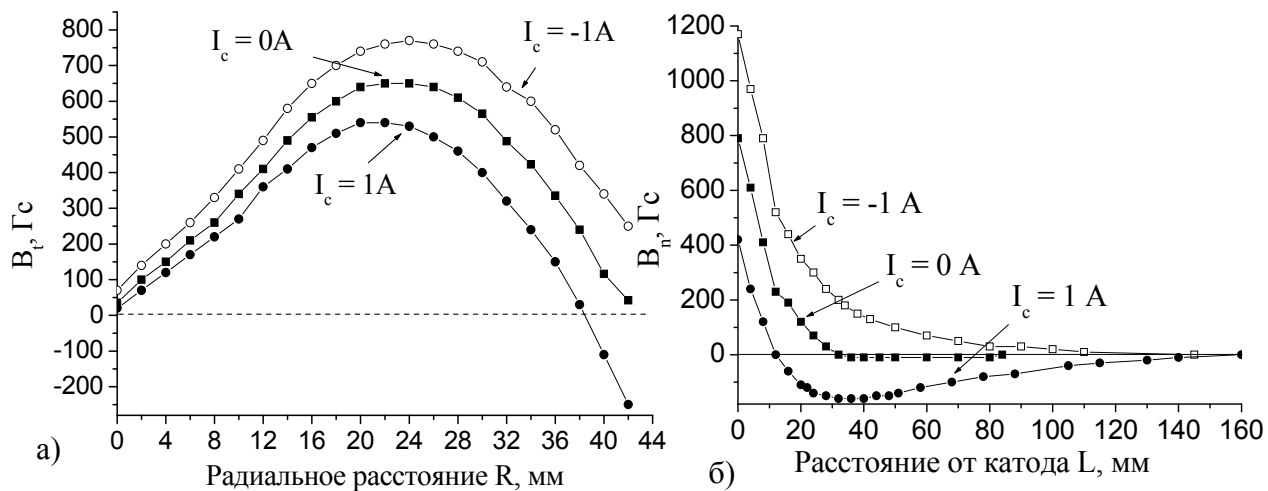


Рис. 4. Распределения тангенциальной (а) и нормальной (б) компоненты магнитного поля в радиальном  $R$  (а) направлении (над поверхностью катода) и аксиальном  $L$  (б) направлении (в центре магнетрона) при разных токах электромагнитной катушки.

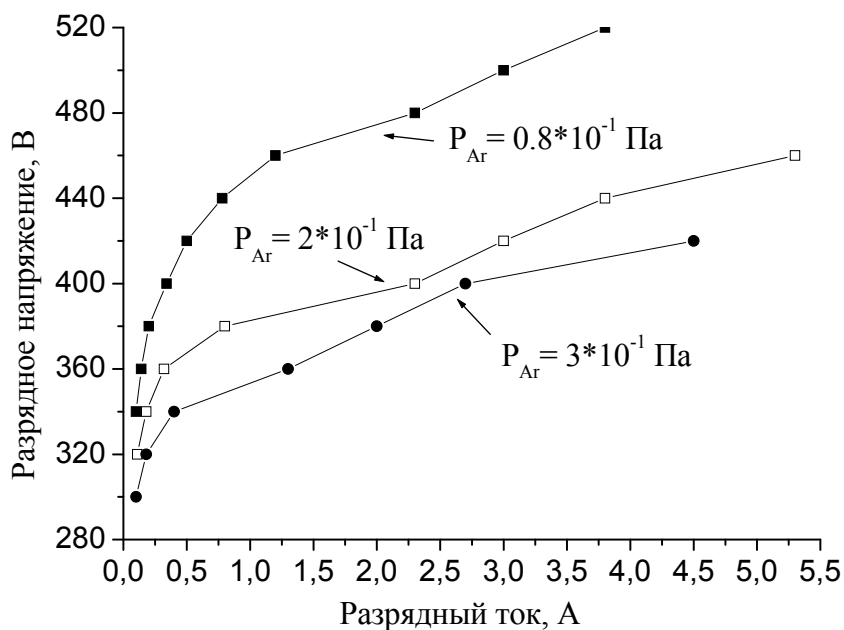


Рис. 5. Вольтамперные характеристики разряда при различных давлениях рабочего газа (электромагнитная катушка выключена). Катод –  $Ti$ .

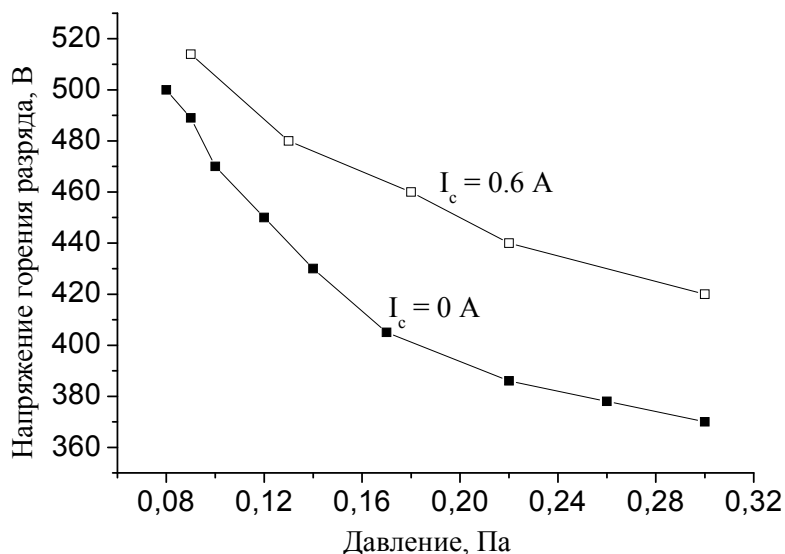


Рис. 6. Зависимости напряжения горения разряда от давления при различных токах электромагнитной катушки.

При включении электромагнитной катушки напряжение горения разряда возрастает (рис. 7), а ВАХ сдвигаются в область больших рабочих напряжений, как и при уменьшении давления (рис. 5). Это объясняется тем, что в несбалансированном режиме уменьшается магнитное поле в магнитной ловушке у поверхности катода (рис. 4,а), а, как известно, магнитное поле и рабочее давление оказывают одинаковое влияние на возникновение и развитие разряда в магнетронных распылительных системах.

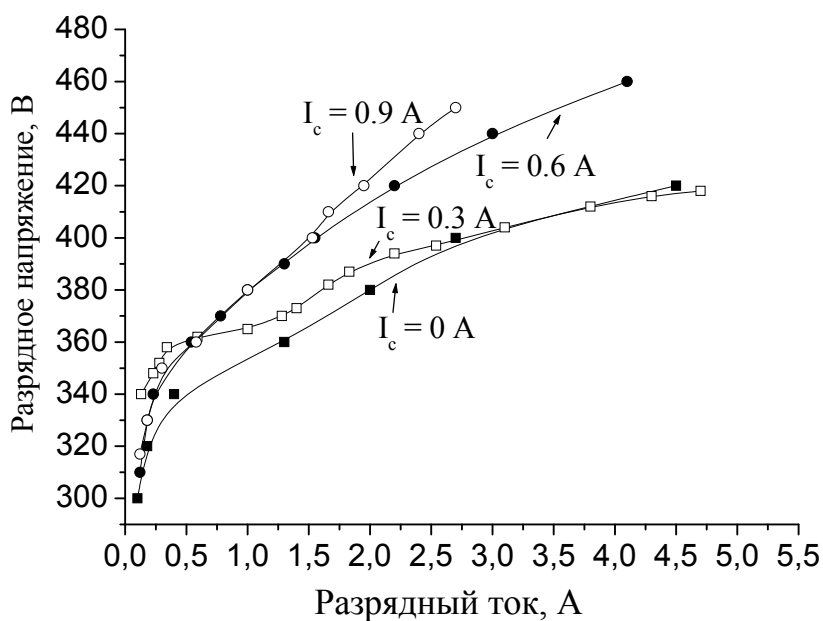


Рис. 7. Вольтамперные характеристики разряда при различных токах катушки ( $P_{Ar} = 0.8 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$ ).



В некоторых случаях, для того чтобы увеличить ионное воздействие на поверхность наносимого покрытия на обрабатываемое изделие подается отрицательный потенциал смещения. На рис. 8 показана зависимость ионного тока на подложку от тока магнетронного разряда при импульсном отрицательном смещении на подложку. Видно, что при увеличении тока разряда происходит пропорциональное увеличение тока на подложку.

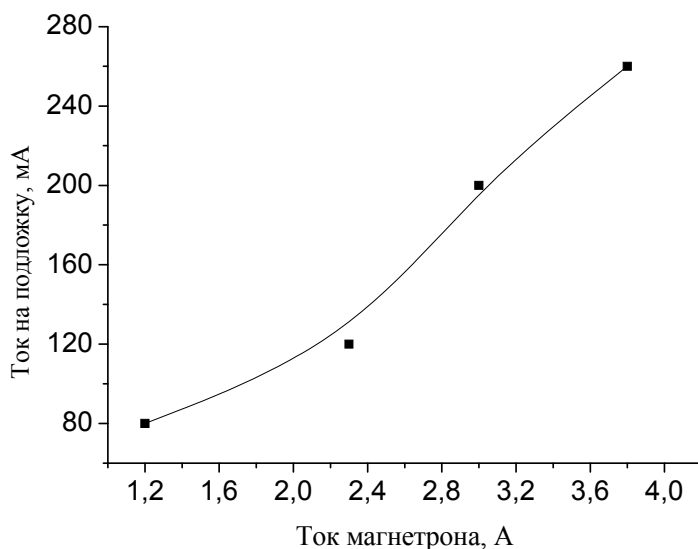


Рис. 8. Зависимость тока на подложку от тока магнетронного разряда ( $P_{Ar} = 0.3 \text{ Па}$ ,  $I_c = 0$ ,  $U_{\text{смещения}} = -100 \text{ В}$ , частота  $U_{\text{смещения}} = 18 \text{ кГц}$ ).

Увеличение тока соленоида значительно повышает ионный ток на коллектор (рис. 9). Это связано, главным образом, с удлинением траектории ионизирующих электронов в магнитном поле. При этом эксперименты при частоте импульсов напряжения смещения от 18 до 100 кГц показали, что частота не является фактором, значительно влияющим на величину тока на коллектор.

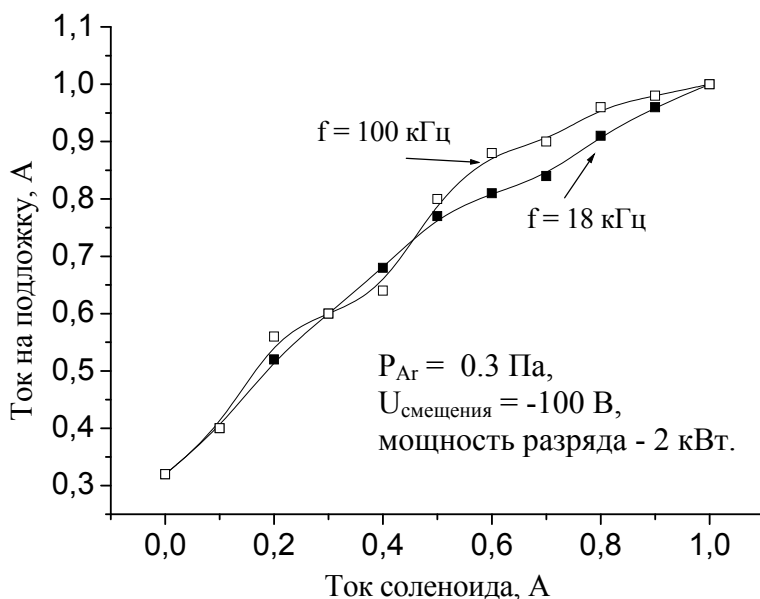


Рис. 9. Зависимость тока на подложку от тока в электромагнитной катушке при частотах импульсов напряжения смещения 18 и 100 кГц.



Для определения плотности ионного тока  $J_i$  на подложку были проведены зондовые измерения плазмы с использованием плоского зонда с охранным кольцом. Зонд располагался на месте подложки таким образом чтобы его поверхность лежала в плоскости подложки. Результаты измерения плотности ионного тока насыщения на зонд, проводимого на расстоянии  $L = 150$  мм от катода, при разных токах в электромагнитной катушке приведены на рис. 10. Мощность разряда поддерживалась постоянной и составляла 0.6 кВт.

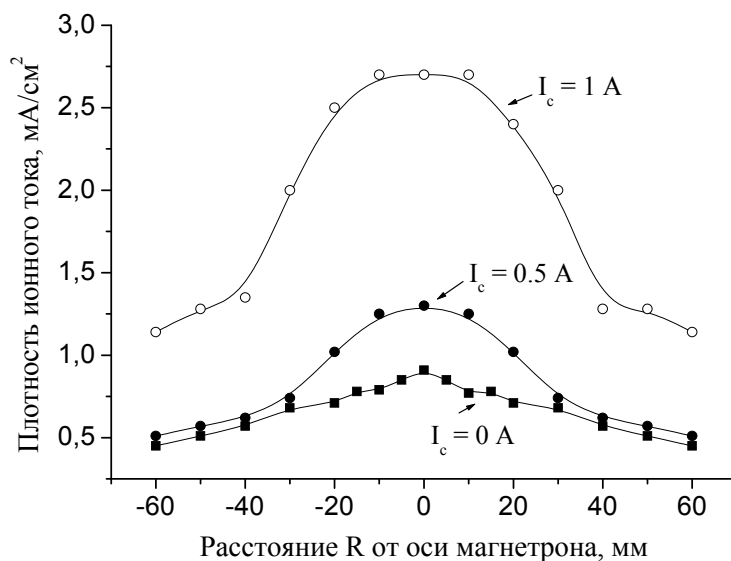


Рис. 10. Радиальные распределения плотности ионного тока на расстоянии 150 мм от катода при различных токах соленоида (мощность разряда 0.6 кВт).

При увеличении тока в электромагнитной катушке наблюдается многократное увеличение плотности ионного тока, наиболее выраженное на оси системы. Это объясняется увеличением степени несбалансированности магнитного поля, силовые линии которого, направляясь в сторону подложки, ограничивают поперечную подвижность электронов и заставляют их двигаться по оси системы. При этом электроны перемещаются совместно с ионами из-за необходимости поддержания электронейтральности плазмы. Визуально, увеличение тока в соленоиде сопровождается уменьшением радиуса светящейся области на катоде и появлением на оси системы потока плазмы, направленного на подложку (рис. 11).

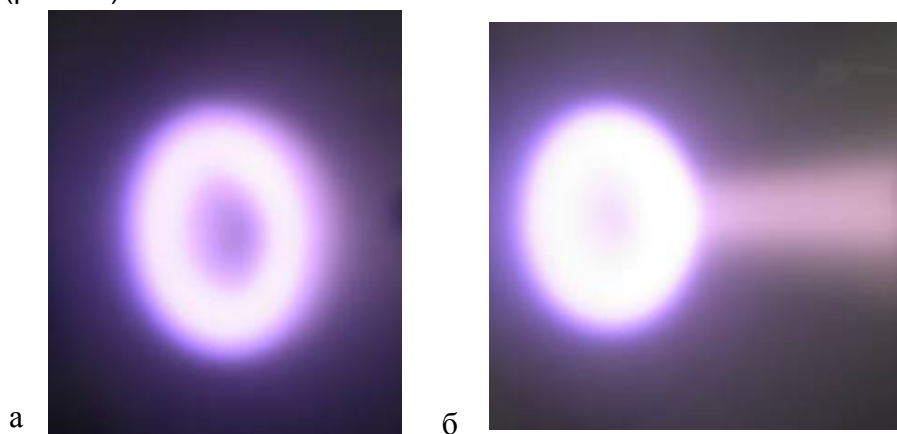


Рис. 11. Свечение плазмы на катоде при выключенной (а) и включенной (б) на максимальном токе (1 А) электромагнитной катушке.

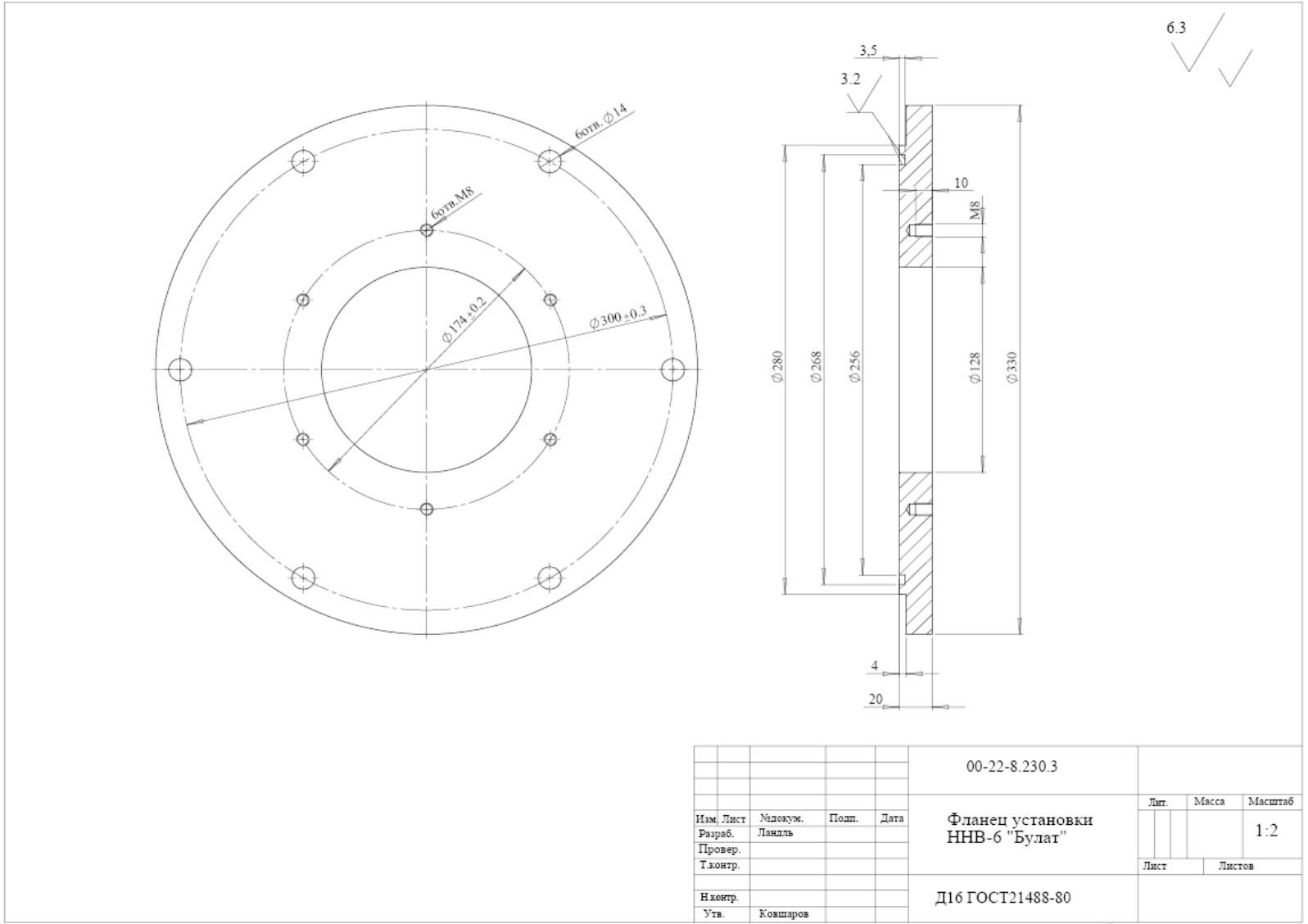


## 6. УСТАНОВКА НА ВАКУУМНУЮ КАМЕРУ

Конструкция магнетрона предусматривает его наружную установку на вакуумную камеру посредством крепежного фланца.

На вакуумные установки типа ННВ-6 «Булат» магнетрон устанавливается на фланце, изображенном на рис. 12, который имеет центральное отверстие диаметром 128 мм и отверстия под крепеж на диаметре 300 мм.

По желанию заказчика магнетрон может быть изготовлен на другом фланце, который также имеет центральное отверстие диаметром 128 мм, но, например, пристыковывается к стандартному фланцу CF-160, имеющему отверстия под крепеж на диаметре 181 мм (рис. 13).



6.3 ✓ ✓

				00-22-8.230.3			Лист	Масса	Масштаб
Изм.	Лист	№ док.ум.	Подп.	Дата	Фланец установки ННВ-6 "Булаг"			1:2	
Разраб.	Лаяль							Лист	Листов
Провер.									
Т. контр.									
Исполн.					Д16 ГОСТ21488-80				
Утв.	Ковшаров								

Рис. 12

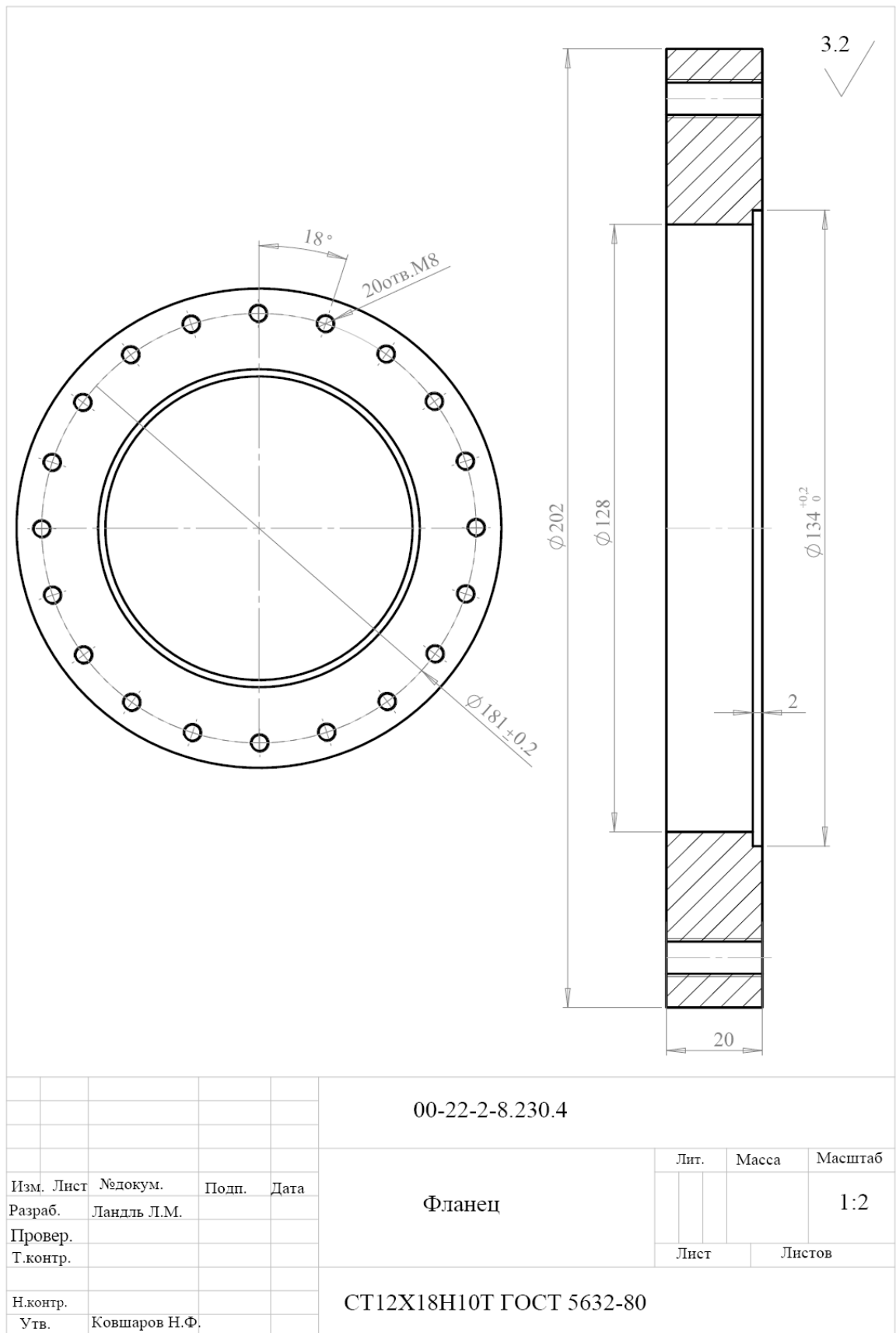


Рис. 13. Вариант крепежного фланца.



## 7. ПОДКЛЮЧЕНИЕ МРС

Перед включением магнетрона необходимо убедиться в подключении его к системе охлаждения и источникам питания самого магнетрона и электромагнитной катушки.

Подача воды в магнетрон осуществляется через трубки 1 (рис. 14,а) с помощью гибких шлангов, имеющих внутренний диаметр около 8 мм.

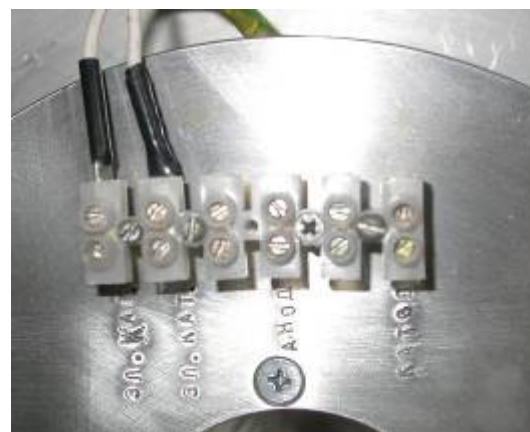
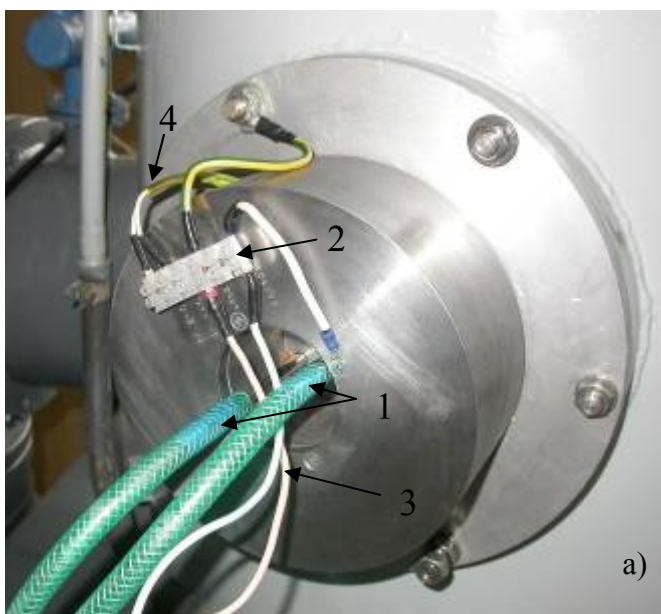


Рис. 14. Внешний вид магнетрона без защитного экрана (а) и клеммной колодки для подключения источников питания (б).

1 – трубки для охлаждения катода, 2 – клеммная колодка, 3 – выводы источника питания магнетрона, 4 - выводы электромагнитной катушки.

Для подключения электропитания, соответствующие выводы от источников питания подсоединяются к клеммной колодке, расположенной на внешнем магнитопроводе (рис. 14,б). При этом «-» источника питания магнетрона подается на клемму с надписью «катод», а «+» источника питания магнетрона подается на клемму с надписью «анод». Клеммы «катод» и «анод» электрически соединены с внешним магнитопроводом и крепежным фланцем, соответственно.

Источник питания электромагнитной катушки подключается к клеммам «Эл. кат.». При этом необходимо учитывать, что при изменении направления тока в катушке на противоположное магнитное поле в магнетроне становится более сбалансированным или несбалансированным.

## 8. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ.

Поскольку в результате распыления на поверхности катода образуется эрозионная канавка, то в техническое обслуживание магнетрона входит своевременная замена распыляемого катода на новый, в случае если глубина эрозионной канавки составляет примерно 90 % от толщины катода. Конструкция магнетрона предусматривает возможность использования катодов диаметром 95 или 100 мм, для чего прилагаются соответствующие прижимные кольца.

Для замены катода необходимо сделать следующее:





1. Открутить винты 1 (рис. 15), снять прижимное кольцо 2 и распыляемый катод 3. При этом охлаждение и электропитание магнетрона должно быть выключено.

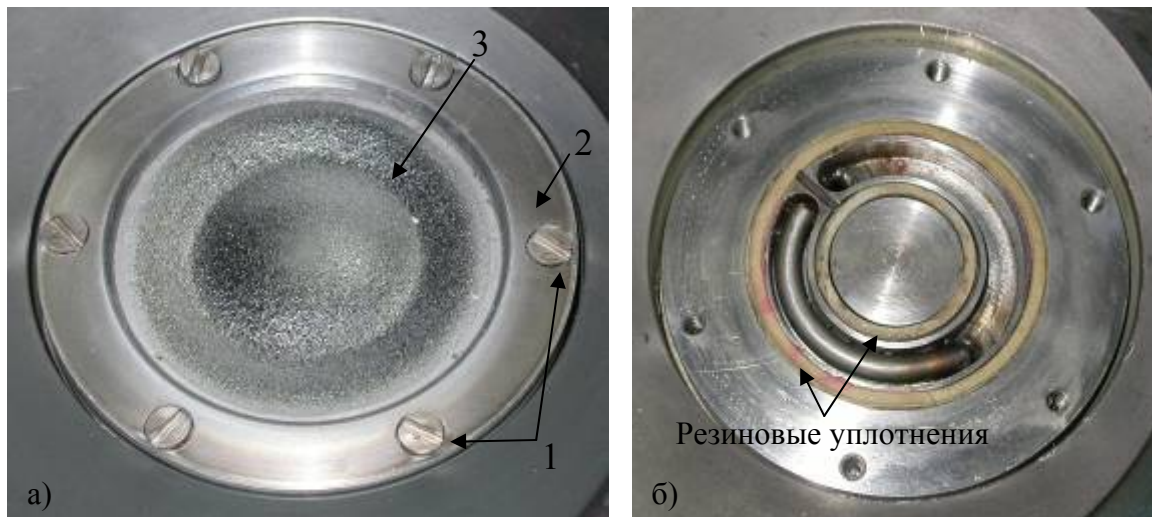


Рис. 15. Внешний вид магнетрона с распыляемым катодом (а) и без катода (б). 1 – крепежные винты, 2 – прижимное кольцо, 3 – катод.

2. Проверить сохранность резиновых уплотнений, изображенных на рис. 15,б. Для предотвращения их деградации под действием высокой температуры мощность разряда не должна превышать 1.5 кВт.

3. Установить новый катод. Новый катод предварительно должен быть очищен от загрязнений любым механическим способом и протерт спиртом.

4. Установить прижимное кольцо и тщательно затянуть крепежные винты.

5. При помощи омметра (тестера) проверить отсутствие электрического контакта между катодом и заземленной частью установки.

## 9. СБОРКА И РАЗБОРКА МАГНЕТРОНА.

При необходимости разборки магнетрона, который находится в собранном виде на вакуумной камере, нужно выполнить следующие действия:

1. Снять защитный экран (рис. 16), открутив гайки, которыми он крепится к крепежному фланцу. Это освободит доступ к местам соединения шлангов системы охлаждения с металлическими трубками охлаждения катода.



Рис. 16. Защитный экран магнетрона.



2. Отсоединить от магнетрона шланги подачи воды.
3. Отсоединить провода источников питания и выводы электромагнитной катушки от клеммной колодки (рис. 14).
4. Открутить винты и снять внешний магнитопровод (рис. 17).
5. Снять электромагнитную катушку с внутреннего магнитопровода (рис. 18).

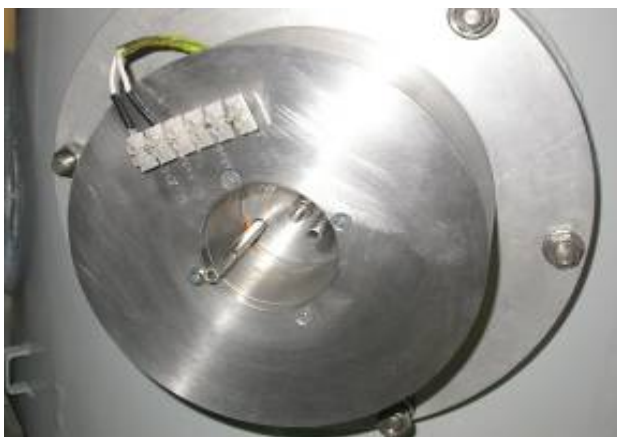


Рис. 17. Внешний магнитопровод магнетрона.



Рис. 18. Электромагнитная катушка.

6. Открутить болт и снять внутренний магнитопровод с постоянными магнитами (рис. 19).
7. Открутить болты и снять фланец, с помощью которых разжимаются вакуумные уплотнения (рис. 20).

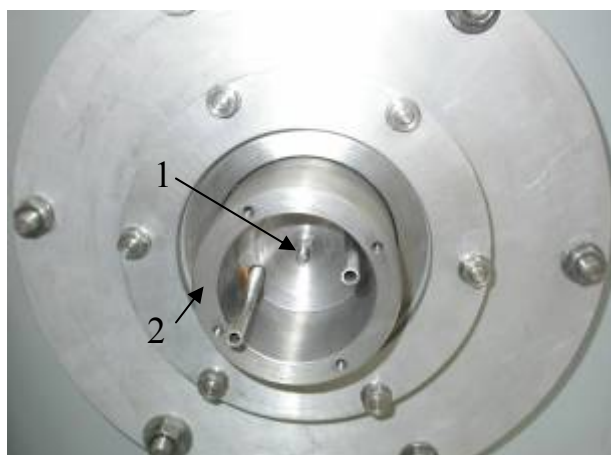
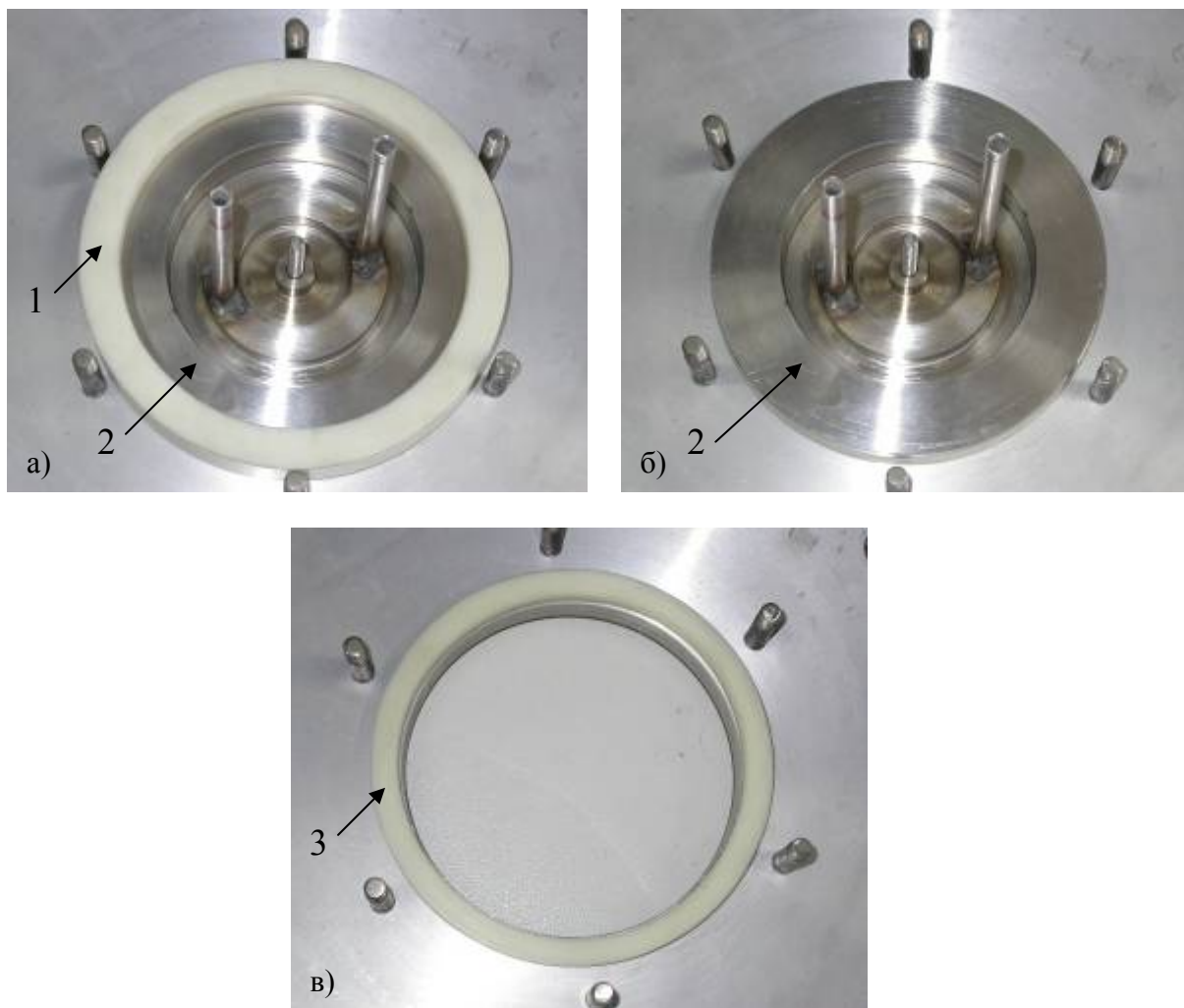


Рис. 19. Внутренний магнитопровод. 1 – крепежный винт, 2 – внутренний магнитопровод.



Рис. 20. Разжимной фланец.

8. Снять внешний капролоновый изолятор (рис. 21,а).
9. Снять катододержатель с резиновым уплотнением (рис. 21,б). Процесс замены катода описан в Разделе 7 (Техническое обслуживание).
10. Снять внутренний капролоновый изолятор с резиновым уплотнением (рис. 21,в).



*Рис. 21. Детали магнетрона.*

*1 – внешний капролоновый изолятор, 2 – катододержатель, 3 – внутренний капролоновый изолятор.*

- Сборка магнетрона осуществляется в обратном порядке:
1. Установить внутренний изолятор с резиновым уплотнением.
  2. Установить на изолятор катододержатель с резиновым уплотнением и катодом.
  3. Установить на катододержатель внешний изолятор.
  4. На изолятор надеть фланец и плотно прижать его винтами.
  5. Установить внутренний магнитопровод с постоянными магнитами, зафиксировать его гайкой.
  6. Установить на внутренний магнитопровод электромагнитную катушку.
  7. Надеть внешний магнитопровод и притянуть его винтами к внутреннему магнитопроводу.
  8. Присоединить провода источников питания и выводы электромагнитной катушки к клеммной колодке (см. Раздел 6 (Подключение магнетрона)).
  9. Присоединить шланги системы охлаждения к металлическим трубкам охлаждения катода.
  10. Надеть защитный экран и зафиксировать его гайками на крепежном фланце.



## 10. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ И МЕРЫ ПРЕДОСТОРОЖНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С МАГНЕТРОНОМ.

1. Запрещается включать магнетрон при снятом защитном экране, из-за возможности прикосновения к внешнему магнитопроводу, находящемуся под катодным потенциалом.

2. Запрещается включать магнетрон при отключенной системе охлаждения или недостаточном давлении воды в ней во избежание перегрева магнетрона и выхода его из строя.

### **Примечание 1. Детали, поставляемые вместе с магнетроном.**

1. Прижимное кольцо, для установки катода другого диаметра (95 ли 100 мм).



**Наши координаты:**

**ООО «Прикладная электроника». Адрес: 634055, г. Томск, пр. Академический 15,  
офис 80, Тел. (3822) 597-451, тел.(факс) 491-651,  
e-mail: [nss4@yandex.ru](mailto:nss4@yandex.ru), [www.apelvac.com](http://www.apelvac.com)**