

Kniaziev, H.M. Kolyushko. Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Tekhnika ta elektrofizyka vysokyykh napruh. Kharkiv: NTU «KhPI», 2013. № 60 (1033). S. 43–51. Print. **8**. Petkov A.A. Veroyatnost' poyavlenyya porazhayushchego razryada molnyy v rayone raspolozhenyya sterzhnevoho ob'ekta. A.A. Petkov. Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Tekhnika ta elektrofizyka vysokyykh napruh. Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. № 21 (1064). S. 115–121. Print. **9**. Kolyushko H.M. Vlyyanye konfyhurationsy systemy elektrodov na raspredelenye tochek porazhenyya ploskosty dlynnoy yskroy. H.M. Kolyushko, P.N. Mel'nykov, O.S. Nedzel'skiy y dr. Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Tekhnika ta elektrofizyka vysokyykh napruh. Kharkiv: NTU «KhPI», 2013. № 60 (1033). S. 57–70. Print. **10**. Kolyushko H.M. Eksperimental'noe issledovanye porazhenyya ploskosty dlynnoy yskroy. H.M. Kolyushko, P.N. Mel'nykov, O.S. Nedzel'skiy y dr. Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Tekhnika ta elektrofizyka vysokyykh napruh. Kharkiv: NTU «KhPI», 2012. № 21. S. 146–153. Print. **11**. DSTU IEC 62305-1:2012 Zakhyst vid blyskavky. – Chastyna 1: Zahal'ni pryntsypy. (IDN, .IEC 62305-1:2010 Protection against lightning – Part 1: General principles). Print. **12**. DSTU B V.2.5-38:2008 Inzhenerne obladyannyya budynkiv i sporud. Ulashtuvannyya blyskavkozakhystu budivel' i sporud. Print. **13**. Kupryenko V.M. Normyrovanye parametrov zony zashchyty sterzhnevyykh molnyeotvodov. V.M. Kupryenko. Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Tekhnika ta elektrofizyka vysokyykh napruh. Kharkiv: NTU «KhPI», 2012. № 21. S. 169–176. Print. **14**. CIGRE TB-549:2013 Lightning Parameters for Engineering Applications. Print. **15**. Lightning Electromagnetics. IET Power and Energy Series 62. Institute of Engineering and Technology, London, UK, 2012. 917 p. Print.

Поступила (received) 23.10.2014

УДК 533.9.07

Ю. В. КОВТУН, канд. физ.-мат. наук, ННЦ ХФТИ НАНУ, Харьков;
А. Н. ОЗЕРОВ, мл. науч. сотр., ННЦ ХФТИ НАНУ Харьков;
Е. И. СКИБЕНКО, канд. физ.-мат. наук, ННЦ ХФТИ НАНУ, Харьков;
В. Б. ЮФЕРОВ, д-р техн. наук, ННЦ ХФТИ НАНУ, Харьков

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА С ВЫСОКОГРАДИЕНТНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ПЛАЗМЫ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА

В статье дано описание электрофизической установки с высокоградиентным магнитным полем для исследования свойств плазмы отражательного разряда, что существенно отличает ее от podobных устройств, созданных и описанных в литературе ранее. Рассмотрены основные узлы и системы установки. Рассчитано распределение магнитного поля по оси и радиусу установки. Проведен тепловой расчет соленоидов. Оценена проводимость вакуумной системы. Приведено также описание систем напуска рабочего газа контролируемым способом и диагностики плазмы с указанием измерительных каналов.

Ключевые слова: отражательный разряд, плазма, магнитное поле, вакуум, соленоид, напуск газа.

© Ю. В. Ковтун, А. Н. Озеров, Е. И. Скибенко, В. Б. Юферов, 2014

Введение. Создание лабораторных плазменных установок позволяет решать актуальные задачи физики плазмы с целью дальнейшего внедрения полученных результатов в технологические циклы вновь создаваемого электрофизического оборудования. Детальное изучение физических процессов дает возможность минимизировать ошибки на стадии проектирования и изготовления оборудования, что в свою очередь приводит к экономии материальных затрат.

Как правило, в таких установках предусматривается возможность функционального разнообразия диагностических средств, используются материалы с наилучшими электро- и теплофизическими свойствами. Но главным критерием при создании лабораторных установок является получение заданных рабочих параметров при относительно невысоких материальных затратах.

Установка предназначена для создания и исследования плазмы в градиентных магнитных полях различной конфигурации и представляет собой отражательный разряд (Пеннинга) с двумя катодами и анодами. Схематическое изображение ее представлено на рис. 1а. Установка содержит следующие основные части: вакуумная разрядная камера 1; магнитная система 2, состоящая из двух катушек и системы их питания; электроразрядная система 3, состоящая из двух противоположающихся катодов и двух анодов и системы их питания; вакуумная система 4, состоящая из средств откачки вакуумной камеры; система напуска рабочего газа 5, состоящая из напускного клапана и ресивера.

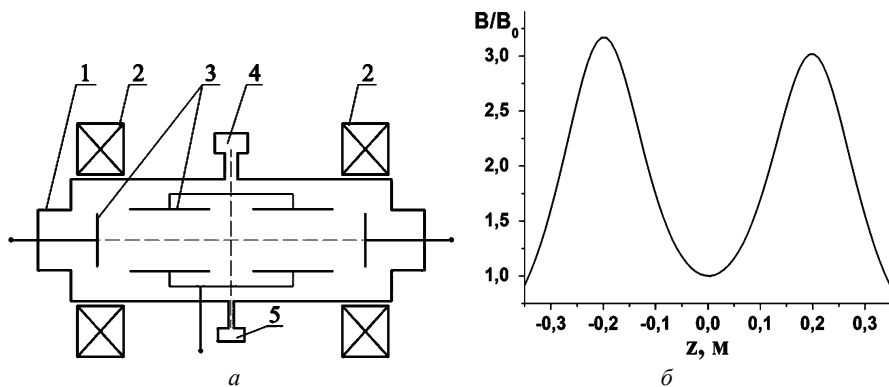


Рисунок 1 – Установка для создания плазмы отражательного разряда в высокоградиентном магнитном поле: а – ее схематическое изображение; б – распределение магнитного поля вдоль аксиальной оси: 1 – вакуумная разрядная камера; 2 – магнитные катушки; 3 – система электродов; 4 – вакуумная система; 5 – система напуска рабочего газа

Описание разрядной вакуумной камеры. Разрядная камера представляет собой полый цилиндр из нержавеющей стали, объемом 13,86 дм³, с тол-

щиной стенки 1 мм, длиной 648 мм, внутренним диаметром 185 мм. Камера установлена на рабочем столе в вертикальном положении. В центральной части камеры по длине окружности расположены патрубки для: вакуумной откачки, напуска рабочего газа, ввода средств диагностики плазмы. На торцах камеры установлены фланцы из органического стекла, на которых размещены катоды, а также симметрично относительно центра камеры установлены катушки, формирующие магнитное поле заданной конфигурации.

Описание магнитной системы. Магнитная система установки состоит из двух соленоидов, центры которых находятся на расстоянии 0,4 м друг от друга и, соответственно, удалены от среднего сечения вакуумной камеры на 0,2 м.

Соленоиды изготовлены в виде катушек, обмотки которых расположены в каркасах из нержавеющей стали и выполнены медным проводом с эмалевой изоляцией диаметром 2,2 мм. Каждый слой обмотки изолирован стеклотентой. Обмотка скреплена несколькими слоями стеклотенты и картона, на которой был наложен бандаж из нержавеющей проволоки. Охлаждение соленоидов воздушное.

Расчет геометрических параметров, индуктивности и сопротивления катушки производился по методике, описанной в [1, 2]. Параметры изготовленных соленоидов представлены в табл. 1.

Таблица 1– Основные параметры соленоидов

| Параметры | Соленоиды | |
|--|-----------------------|-----------------------|
| | № 1 | № 2 |
| Внутренний диаметр обмотки, $2a_1$, м | 0,194 | 0,194 |
| Наружный диаметр обмотки, $2a_2$, м | 0,32 | 0,33 |
| Длина обмотки, $2b$, м | 0,07 | 0,07 |
| Безразмерный внешний диаметр соленоида, $\alpha=2a_2/2a_1$ | 1.649 | 1.701 |
| Безразмерная высота соленоида $\beta=2b/2a_1$ | 0.361 | 0.361 |
| Число слоев | 31 | 31 |
| Число витков N | 931 | 899 |
| Объем соленоида, V , м ³ | $3.561 \cdot 10^{-3}$ | $3.918 \cdot 10^{-3}$ |
| Коэффициент заполнения, λ | 0.745 | 0.69 |
| Длина проводника, l , м | 751.679 | 739.964 |
| Масса проводника, m , кг | 23.588 | 24.047 |
| Индуктивность, L , Гн | 0.101 | 0.091 |
| Сопротивление, R , Ом | 3.671 | 3.614 |

При изменении температуры обмотки катушки также изменяется и ее активное сопротивление. Учет влияния температуры на сопротивление катушек производился согласно уравнения [3]:

$$\frac{R_T}{R_0} = 1 + \alpha_{0,T} \Delta T, \quad (1)$$

где R_0 и R_T – соответственно, сопротивление проводника при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и текущей температуре, Ом (для меди в интервале температур $0\div 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ $R_T/R_0 = 1,426$); $\alpha_{0,T}$ – температурный коэффициент сопротивления, K^{-1} (для меди в интервале температур $0\div 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\alpha_{0,100} = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \Delta T} = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$); ΔT – изменение температуры, К.

Результаты расчета представлены в табл. 2 и на рис. 2.

Измерение сопротивления катушек производилось мостом постоянного тока типа МО-62 (класс 0,1) при температуре окружающего воздуха $19\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сравнение результатов измерения и расчетов, представленных в табл. 2, показывает, что они находятся в хорошем согласии между собой.

Таблица 2– Результаты расчета и измерения активного сопротивления обмотки соленоида при изменении температуры

| Параметр | Значение | |
|--|------------------|------------------|
| | № 1 | № 2 |
| $R(\text{расчет } 0\text{ }^{\circ}\text{C}), \text{ Ом}$ | 3.383 | 3.33 |
| $R(\text{расчет } 18\text{ }^{\circ}\text{C}), \text{ Ом}$ | 3.642 | 3.585 |
| $R(\text{измерение } 19\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}), \text{ Ом}$ | $3,641\pm 0,007$ | $3,578\pm 0,007$ |

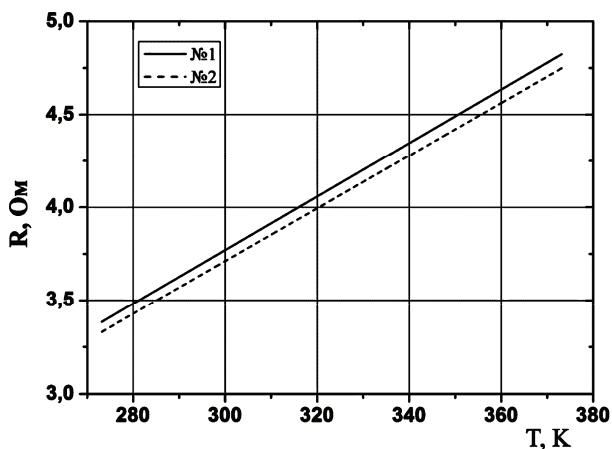


Рисунок 2 – Зависимость сопротивления катушек от температуры.

Магнитная индукция в центре осесимметричной катушки определяется из соотношения [4]:

$$B_0 = \frac{\mu_0 J_\phi}{2} 2b \ln \left(\frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + b^2}}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + b^2}} \right), \text{ Тл} \quad (2)$$

где μ_0 магнитная проницаемость вакуума, $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$, J_ϕ – средняя плотность тока по сечению катушки, определяемая как:

$$J_{\phi} = \frac{IN}{S} = \frac{IN}{2b(a_2 - a_1)}, \text{ A/м}^2 \quad (3)$$

где I – ток, А; S – площадь поперечного сечения катушки, м².

Распределение индукции B_z магнитного поля на оси z катушки прямоугольного сечения со средней плотностью тока J_{ϕ} определяется как [4]:

$$B_z = \frac{\mu_0 J_{\phi}}{2} \left[(b-z) \ln \left(\frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + (b-z)^2}}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + (b-z)^2}} \right) + (b+z) \ln \left(\frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + (b+z)^2}}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + (b+z)^2}} \right) \right], \text{ Тл.} \quad (4)$$

Магнитная система способна формировать магнитные поля различной конфигурации. Конфигурация с градиентом магнитного поля (типа «магнитный берег»), создается путем включения одной из катушек 1 или 2. Пробочная конфигурация магнитного поля создается путем последовательного включения катушек, причем ток течет по обмоткам в одном направлении.

Результаты расчета распределения индукции магнитного поля по оси установки в случае конфигурации поля типа «магнитный берег», представлены на рис. 3. Магнитная индукция в центре катушки составляет 0,05 Тл при токе 10 А.

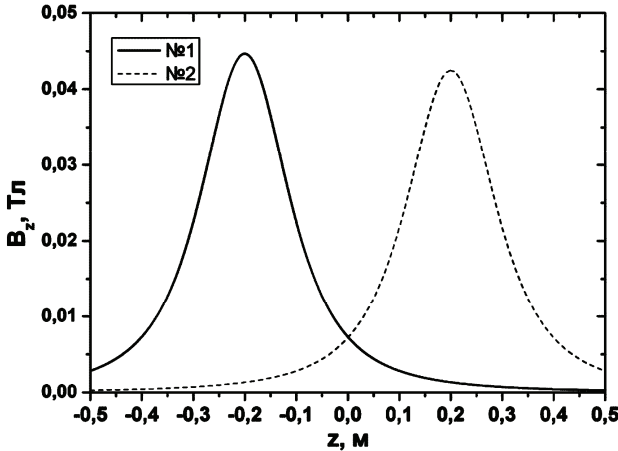


Рисунок 3 – Распределение продольной составляющей индукции магнитного поля B_z по оси установки, при включении катушки 1 или 2 при токе $I = 10$ А

При работе магнитной системы в режиме пробочной конфигурации распределение магнитного поля по длине и радиусу магнитной системы рассчитывалось методом суперпозиций полей от каждой катушки [4]. Результаты расчета представлены на рис. 1, б в виде отношения B/B_0 , где B_0 – значение магнитной индукции в центре установки; B – значение магнитной индукции в текущей координате: $B = (B_z^2 + B_r^2)^{0,5}$; B_z , B_r – продольная и радиальная со-

ставляющая магнитной индукции.

В результате такой коммутации катушек формируется магнитное поле с двумя пробками. Расстояние между пробками 405 мм. Пробочное отношение в магнитной пробке № 1 и № 2 составило соответственно $R_{B1} = 3,17$ и $R_{B2} = 3,02$.

Ввиду различия параметров соленоидов (табл. 1), пробочное отношение R_{B1} превосходит R_{B2} на 4,97 %. Магнитная постоянная $B/I = 0,00145$ Тл/А.

Наряду с расчетом было проведено измерение магнитного поля по оси и радиусу установки. Измерения проводились с помощью измерителя магнитной индукции типа Ш1-8. Ток через магнитную систему измерялся через шунт постоянного тока типа 75ШСМ3-50-0,5 (класс 0,5) и вольтметра типа В7-27А. Результаты расчетов и измерений представлены на рис. 4-6. Как видно из рисунков, результаты расчета находятся в хорошем согласии с выполненными измерениями. В центральном сечении установки ($z = 0$) доминирует продольная составляющая магнитной индукции B_z , многократно превышающая радиальную составляющую B_r . Максимальное измеренное значение магнитной индукции наблюдалось по центру магнитной катушки №1 ($z = -0.2$ м) и составило 0,16 Тл при токе 40 А.

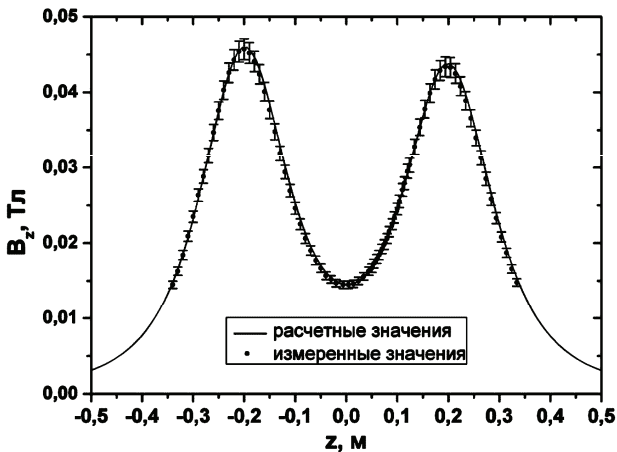


Рисунок 4 – Распределение продольной составляющей индукции магнитного поля B_z по оси установки, в режиме пробочной конфигурации, ток $I = 10$ А

Питание магнитной системы осуществляется от источника постоянного напряжения, которое может варьироваться в пределах от 10÷300 В. Потребляемая мощность соленоидов, формирующих магнитное поле пробочной конфигурации, при номинальном рабочем напряжении питания 300 В, составляет 12,35 кВт. При этом значение магнитной индукции в пробке № 1 составляет 0,184 Тл, в пробке № 2 0,175 Тл.

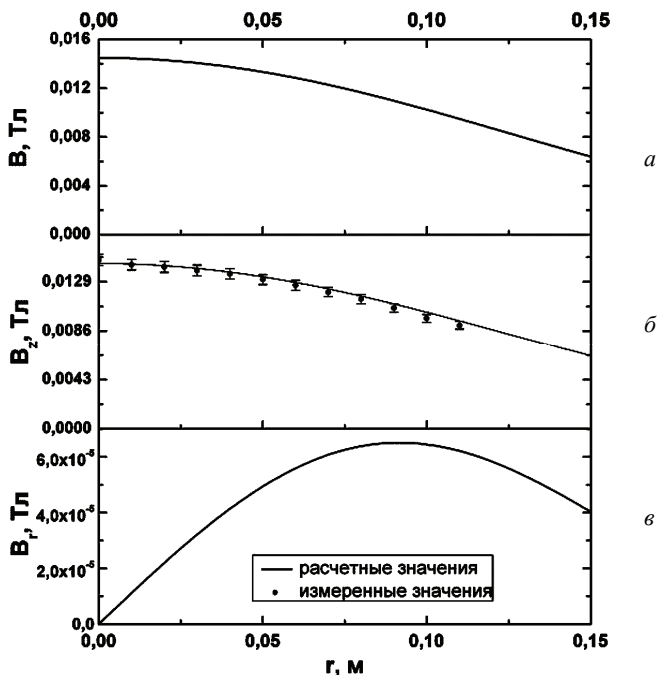


Рисунок 5 – Распределение магнитной индукции по радиусу установки, $z = 0$, ток $I = 10$ А: *a* – модуля вектора; *б* – продольной составляющей; *в* – радиальной составляющей

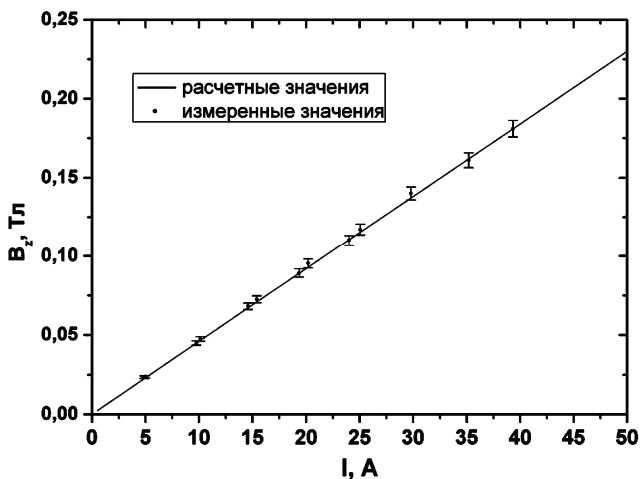


Рисунок 6 – Зависимость продольной составляющей магнитной индукции в точке $z = -0,2, r = 0$ от величины тока

Поскольку катушки магнитной системы не имеют принудительной системы охлаждения, то представляет интерес расчет времени нагрева катушек. В данном случае можно рассматривать процесс нагрева катушек как нагрев тела с внутренним источником теплоты, то есть с объемным тепловыделением [5]. Общее количество теплоты, идущее на повышение температуры тела, равно:

$$Q = Cm\Delta T, \text{ Дж} \quad (5)$$

где C – удельная теплоемкость, Дж/кг·К; m – масса тела, кг; ΔT – изменение температуры тела $\Delta T = T_2 - T_1$, К.

Учитывая, что $Q = I^2 R t$ приведем уравнение (5) к виду:

$$t = \frac{Cm\Delta T}{I^2 R}, \text{ с} \quad (6)$$

где t – время нагрева, с.

Учитывая значение температуростойкости обмоточного провода, принимаем максимальную допустимую температуру 363,15 К. Начальную температуру принимаем 293,15 К и, соответственно, $\Delta T = 70$ К. Удельная теплоемкость меди при 20 °С равна 381,042 Дж/кг·К [6]. Результаты расчета, выполненные для обеих катушек, показывают, что времена нагрева катушек имеют близкие значения, поэтому дальнейшие расчеты будут проводиться для катушки № 1.

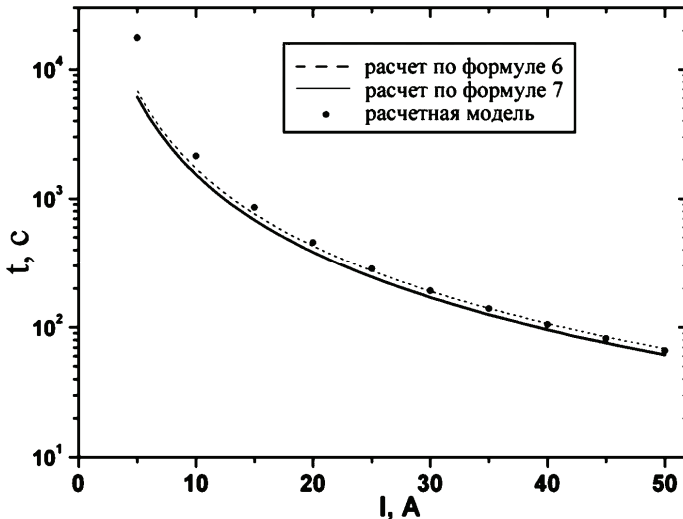


Рисунок 7 – Зависимость времени нагрева катушки при постоянном температурном градиенте $\Delta T = 70$ К от тока

Учитывая изменение от температуры теплоемкости и сопротивления выражение (6) примет вид:

$$t = \frac{m}{I^2} \int_{T_1}^{T_2} \frac{c(T)}{R(T)} dT, \text{ с.} \quad (7)$$

В реальных условиях происходит также естественное охлаждение катушек, где теплообмен за счет теплопроводности происходит от обмотки к каркасу катушки, а от каркаса к окружающей среде за счет конвекции и излучения. Поэтому для расчета температуры катушки была построена двухмерная модель, учитывающая теплообмен с каркасом и его охлаждение за счет излучения. Теплоемкость и теплопроводность материалов была взята из [6-8]. Коэффициент черноты принят 0,98. Результаты расчета представлены на рис. 7. Как видно из рис. 7, при токах менее 10 А теплоотвод от обмотки уже начинает играть заметную роль и его необходимо учитывать при расчете времени нагрева катушки. Расчетное время нагрева при токах менее 15 А составляет десятки минут; для полноты описания теплового режима магнитной системы требуется также учитывать конвективное охлаждение. При токах 20÷50А расчетное время нагрева составляет, соответственно, от 7 до 1 мин, что вполне достаточно для проведения исследований свойств и параметров плазмы.

Описание электроразрядной системы. Электроразрядная система состоит из двух холодных катодов в форме дисков диаметром 80 мм, толщиной 3 мм и двух анодов в виде полых цилиндров с внутренним диаметром 95 мм, высотой 120 мм, толщиной стенки 1,5 мм. Катоды располагаются на торцах камеры и выполнены в двух вариантах: медные и титановые. Аноды, из нержавеющей стали, между собой располжены соосно на расстоянии 60 мм и установлены коаксиально относительно вакуумной камеры.

Питание электроразрядной системы осуществляется от источника постоянного напряжения 1 кВ. Разрядный ток до 1 А.

Описание вакуумной системы. Основные узлы вакуумно-откачной системы представлены на рис. 8. В качестве форвакуумного насоса используется пластинчато-роторный насос типа 2НВР-5ДМ (11) с быстротой действия 5 л/с и предельным остаточным давлением $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па ($9,75 \cdot 10^{-5}$ Торр). Для получения высокого вакуума используется диффузионный паромасляный вакуумный насос (1) типа 7НВДМ – 160 с быстротой действия 700 л/с и предельным остаточным давлением $6,6 \cdot 10^{-7}$ Па ($5 \cdot 10^{-7}$ Торр) с механической водоохлаждаемой ловушкой (2), а также криоконденсационный насос (4). Измерение остаточного давления в диапазоне $1,013 \cdot 10^5 \div 133,33$ Па ($760 \div 1$ Торр) производится деформационным вакуумметром (13); в диапазоне $666,65 \div 2 \cdot 10^{-8}$ Па ($5 \div 1,5 \cdot 10^{-10}$ Торр) ионизационно-термопарными вакуумметрами типа ВИТ-2, ВИТ-3, ионизационным вакуумметром типа ВИ-14. Использование термопарных преобразователей типа ПМТ-2 и ПМТ-4М (5, 9, 14) позволяет измерять давление в диапазоне $666,65 \div 1,33 \cdot 10^{-2}$ Па ($5 \div 1 \cdot 10^{-4}$ Торр), ионизационных преобразователей типа ПМИ-2, ПМИ-27, ПМИ-10-2, (7, 8, 17) в диапа-

зоне $133,33 \div 2 \cdot 10^{-8}$ Па ($1 \div 1,5 \cdot 10^{-10}$ Торр).

Вакуумные агрегаты подсоединяются через торцевые патрубки круглого и эллиптического сечения. Наименьшая проводимость вакуумной системы приходится на участок трубопровода с эллиптическим сечением длиной 45 мм, малой и большой осью эллипса 14 и 76 мм. Пропускная способность этого участка составила [9]: в молекулярном режиме 55 л/с при числе Кнудсена $K_n = 0,33$; в вязкостном режиме 408 л/с при $K_n = 0,01$.

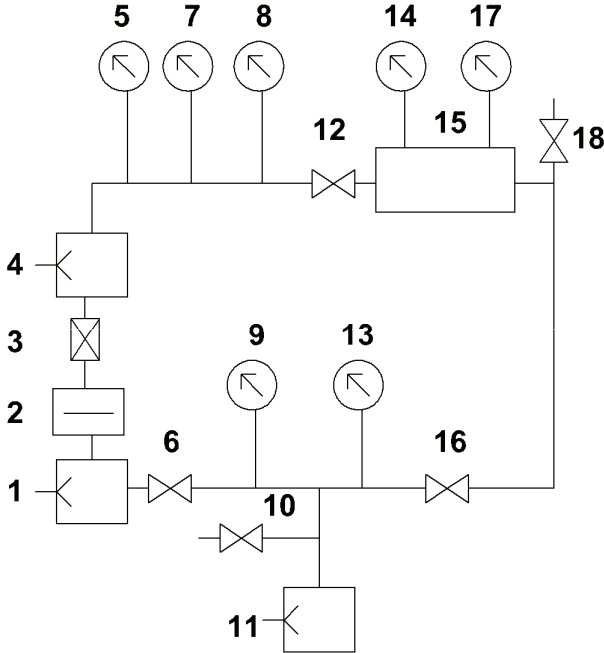


Рисунок 8 – Схема вакуумно-откачной системы: 1 – диффузионный насос; 2 – ловушка; 4 – криоконденсационный насос; 3, 6, 10, 12, 16, 18 – клапан; 5, 9, 14 – термопарный преобразователь; 7, 8, 17 – ионизационный преобразователь; 11 – механический насос; 13 – деформационный преобразователь; 15 – вакуумная камера

Описание системы напуска рабочего газа. Система напуска рабочего вещества в вакуумную разрядную камеру осуществляет напуск газа в область формирования плазмы. Расход газа регулируется с целью получения заданных плотностей частиц для образования плазмы и поддержания ее необходимых параметров. Система напуска снабжена запорно-регулирующей арматурой, измерителями давления широкого диапазона.

Напуск рабочего газа аргона, гелия производится клапаном КМПН-10, работающего как в стационарном так и в импульсном режиме. Клапан работает от импульсного источника питания, принцип действия которого основан

на разряде предварительно заряженного конденсатора на обмотку электромагнита клапана. Так как клапан имеет большую проводимость, 0,6 л/с при атмосферном давлении, то напуск газа в источник производился из дополнительной камеры с пониженным давлением.

Система диагностики плазмы. Экспериментальная техника, используемая при диагностике плазмы, чрезвычайно разнообразна и опирается на весь технический арсенал современной физики. При выборе средств диагностики необходимо руководствоваться, прежде всего, необходимой точностью измерения и функциональной возможностью установки диагностического оборудования в разрядную камеру. Исходя из этого, для диагностики плазмы в установке предлагается использовать:

- измерительные шунты постоянного тока и резистивно-емкостной делитель напряжения, для измерения параметров электрической цепи;
- двойной зонд Ленгмюра, для измерения температуры и плотности плазмы;
- СВЧ-интерферометр, для измерения средней плотности плазмы;
- рефлектометр-коррелятор для исследования флуктуаций плотности плазмы;
- оптические методы, для измерения интенсивности и длительности светового излучения плазмы;
- спектрометр, для определения элементного и зарядового состава плазмы.

Заключение. Электрофизическая установка для создания плазмы в высокоградиентных магнитных полях при низких давлениях газа представляет собой единый комплекс взаимосвязанных систем, работа которых позволяет реализовать актуальные научно-технические задачи для отражательного разряда. Результаты исследования дополняют теорию и практику исследуемого разряда именно в высокоградиентном магнитном поле.

Список литературы: 1. Брехна Г. Сверхпроводящие магнитные системы / Г. Брехна [пер. с англ. под ред. В. Р. Карасика]. – М.: Мир, 1976 – 704 с. 2. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные поля / Г. Кнопфель [пер. с англ. под ред. Ф. А. Николаева, Е. П. Свириденко]. – М.: Мир, 1972 – 382 с. 3. Линеверг Ф. Измерение температур в технике. Справочник / Ф. Линеверг [пер. с англ. под ред. Л. А. Чарихова]. – М.: Металлургия, 1980 – 544 с. 4. Алиевский Б. Л. Расчет параметров магнитных полей осесимметричных катушек: Справочник / Б. Л. Алиевский, В. Л. Орлов. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 112 с. 5. Болгарский А. В. Термодинамика и теплопередача / А. В. Болгарский, Г. А. Мухачев, В. К. Щукин // – М.: Высшая школа, 1975. – 495 с. 6. Chase M. W., Jr. NIST-JANAF Thermochemical tables. / M. W. Chase, Jr. // Journal of Physical and Chemical Reference Data. Monograph № 9. – 1998. – P. 1–1951. 7. Ho C. Y. Thermal conductivity of the elements: A comprehensive review / C. Y. Ho, R. W. Powell, P. E. Liley // Journal of Physical and Chemical Reference Data. – 1974. – Vol. 3, Supplement №1. – P. 1–796. 8. Бабичев А. П. Физические величины. Справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с. 9. Фролов Е. С. Вакуумная техника. Справочник / Е. С. Фролов, В. Е. Минайчев, А. Т. Александрова. – М.: Машиностроение, 1985. – 360 с.

Bibliography (transliterated): 1. Brehna, G. "Sverhprovodyashhie magnitnye sistemy." Moskva: Mir,

1976. Print. 2. Knopf, G. "Sverxsilnye impulsnye polya". Moskva: Mir, 1972. Print. 3. Lineveg, F. "Izmerenie temperatur v tekhnike. Spravochnik". Moskva: Metallurgiya, 1980. Print. 4. Alievskij, B. L. and Orlov V. L. "Raschet parametrov magnitnykh polej osesimmetrichnykh katushek: Spravochnik". Moskva: Energoatomizdat, 1982. Print. 5. Bolgarskij, A. V., G. A. Muxachev and V. K. Shhukin. "Termodinamika i teploperedacha". Moskva: Vysshaya shkola, 1975. Print. 6. Chase, M. W. "NIST-JANAF Thermochemical tables". Journal of Physical and Chemical Reference Data. Monograph № 9 – 1998. – P. 1–1951. Print. 7. Ho, C. Y., R. W. Powell and P. E. Liley. "Thermal conductivity of the elements: A comprehensive review". Journal of Physical and Chemical Reference Data. – 1974. – Vol. 3, Supplement №1. – P. 1–796. Print. 8. Babichev, A. P., N. A. Babushkina, A. M. Bratkovskij. "Fizicheskie velichiny. Spravochnik". Moskva: Energoatomizdat, 1991. Print. 9. Frolov, E. S., V. E. Minajchev and A. T. Aleksandrova. "Vakuumnaya tekhnika. Spravochnik". Moskva: Mashinostroenie, 1985. Print.

Поступила (received) 02.10.2014

УДК 519.2

Г.М. КОЛИУШКО, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;
О.С. НЕДЗЕЛЬСКИЙ, вед. инженер, НТУ «ХПИ»;
Е.Г. ПОНУЖДАЕВА, зав. лаб., НТУ «ХПИ»;
А.В. ПЛИЧКО, мл. научн. сотр., НТУ «ХПИ»;
Д.И. КОВАЛЕВ, ассистент, НИУ «МЭИ», Москва, Россия

КОНСТРУКЦИЯ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА УСТРОЙСТВА БЛОКИРОВКИ ОПЕРАТИВНЫХ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ УБОП

В статье представлена конструкция разработанного опытного образца устройства блокировки оперативных переключений УБОП. Устройство предназначено для работы в системе обеспечения блокировок безопасности коммутирующих аппаратов высокого напряжения энергообъектов. Описана работа механизма УБОП с электромагнитным приводом. Представлены результаты экспериментальных исследований термодинамических показателей работы УБОП в длительном режиме включения электромагнитного привода механизма блокировки.

Ключевые слова: устройство блокировки оперативных переключений, замковый механизм, электромагнит, температура нагрева.

Введение. Разработка нового комплекса электрооборудования (КЭО), включающего в себя устройства блокировки несанкционированных оперативных переключений коммутирующего электрооборудования (разъединители, заземлители и т.п.), потребовало создание новых устройств блокировки, в частности – блок-замков с электромагнитным механизмом управления. Устройства блокировки оперативных переключений (УБОП) должны быть адаптированы к разрабатываемому КЭО с «интеллектуальным» управлением, по-

© Г.М. Колиушко, О.С. Недзельский, Е.Г. Пон, А.В. Пличко, Д.И. Ковалев, 2014

УДК 533.9.07

Електрофізична установка з високоградієнтним магнітним полем для дослідження властивостей плазми відбивного розряду / Ю. В. Ковтун, О. М. Озеров, Є. І. Скібенко, В. Б. Юферов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 98-109. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

У статті дано опис електрофізичної установки з високоградієнтним магнітним полем для дослідження властивостей плазми відбивного розряду, що істотно відрізняє її від подібних пристроїв, створених і описаних в літературі раніше. Розглянуто основні вузли та системи установки. Розраховано розподіл магнітного поля по осі і радіусу установки. Проведено тепловий розрахунок соленоїдів. Оцінена провідність вакуумної системи. Приведено також опис систем напуску робочого газу контрольованим способом і діагностики плазми із зазначенням вимірювальних каналів.

Ключові слова: відбивний розряд, плазма, магнітне поле, вакуум, соленоїд, напуск газу.

УДК 533.9.07

Электрофизическая установка с высокоградиентным магнитным полем для исследования свойств плазмы отражательного разряда / Ю. В. Ковтун, А. Н. Озеров, Е. И. Скибенко, В. Б. Юферов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 98-109. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

В статье дано описание электрофизической установки с высокоградиентным магнитным полем для исследования свойств плазмы отражательного разряда, что существенно отличает ее от подобных устройств, созданных и описанных в литературе ранее. Рассмотрены основные узлы и системы установки. Рассчитано распределение магнитного поля по оси и радиусу установки. Проведен тепловой расчет соленоидов. Оценена проводимость вакуумной системы. Приведено также описание систем напуска рабочего газа контролируемым способом и диагностики плазмы с указанием измерительных каналов.

Ключевые слова: отражательный разряд, плазма, магнитное поле, вакуум, соленоид, напуск газа.

Electrophysical installations with high-gradient magnetic field to study the properties of the plasma reflex discharge / Yu.V.Kovtun, A.N.Ozerov, A.I.Skibenko, E.I.Skibenko, V.B.Yuferov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – С. 98-109. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-0740.

The article describes the electrophysical installations with high-gradient magnetic field to study the properties of the plasma reflex discharge, which distinguishes it from similar devices developed and described in the literature previously. The main components and system installation. Calculated distribution of the magnetic field along the axis and the radius of the device. Held thermal design solenoids. Estimated conductivity of the vacuum system. Are also included working gas vent systems in a controlled manner and plasma diagnostics indicating the measuring channels.

Keywords: reflective discharge, plasma, magnetic field, vacuum, solenoid, lapping gas.