

ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ РАЗДЕЛЯЕМОЙ ПЛАЗМЫ, ОБРАЗОВАННОЙ В РАЗРЯДЕ С ОСЦИЛЛИРУЮЩИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ (ПЕННИНГА)

Е.И. Скибенко, Ю.В. Ковтун, А.И. Скибенко, В.Б. Юферов

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,

Харьков, Украина

E-mail: Ykovtun@kipt.kharkov.ua

По результатам ранее выполненных расчетов и экспериментов проведена оптимизация выбора параметров разделяемой плазмы, образованной в разряде с осциллирующими электронами (Пеннинга), для сокращения их количества и упрощения начальной стадии исследования ее свойств.

ВВЕДЕНИЕ

При всех неоспоримых достоинствах процесса выработки электрической энергии на современных атомных электростанциях (АЭС) имеется один существенный и неисчезающий со временем недостаток – наработка и накопление значительного количества отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и радиоактивных отходов (РАО). Однако решение проблемы ОЯТ и РАО усложняется тем, что перед захоронением (или длительным хранением) этих отходов необходимо разделение их на две фракции из-за различия радиационных и массовых характеристик облученного топлива. Переработка ОЯТ и РАО может производиться либо традиционным радиохимическим методом, либо альтернативным – с помощью разрабатываемых ныне магнитоплазменных методов разделения вещества на составляющие и установок для их реализации. При этом следует отметить, что разработка альтернативных методов и устройств переработки ОЯТ является весьма актуальной и необходимой. В настоящее время сформулированы модернизированные взгляды [1] как на проблематику образования разделяемой плазмы, так и на проблематику разделения вещества на составляющие в ионизированном состоянии. Данная работа посвящена рассмотрению оптимизированного варианта исследования разделяемой плазмы, что должно позволить снизить экспериментальную нагрузку при проведении начальной стадии исследований и уменьшить материально-технические затраты на ее реализацию.

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРЯДОВ, СОЗДАЮЩИХ РАЗДЕЛЯЕМУЮ ПЛАЗМУ

Магнитоплазменные разделительные устройства являются весьма энергонасыщенными. Поэтому поиск путей повышения их энергетического коэффициента полезного действия (КПД) является несомненно востребованным. Одним из таких путей есть разработка и развитие разделительных устройств так называемого нового физического направления, которые отличаются от всех остальных только одним свойством, а именно: образование и нагрев плазмы в них происходит за счет развития физических процессов и механизмов в самой плазме, приводящих к возбуждению СВЧ- и ВЧ-колебаний, ответственных за нагрев электронов и ионов плазмы.

К ним в первую очередь следует отнести разделительные устройства [2] на основе пучково-плазменного и отражательного разрядов, в которых эффективный нагрев плазмы происходит вследствие развития пучково-плазменной и резонансной циклотронной неустойчивости во вращающейся плазме соответственно. Анализ плазмообразующих систем (ПОС) на основе пучково-плазменного разряда (ППР) и отражательного разряда (ОР) приводит к весьма важному выводу [3, 4] о том, что эти системы могут быть взаимозаменяемыми в пределах основного модуля разделительного устройства, включающего в себя магнитную и вакуумную системы, а также системы физической и технологической диагностики, контроля и управления, сбора продукции разделения и др. На рис. 1 приведен пример модульного варианта устройства для разделения вещества на составляющие, предусматривающий взаимозаменяемость плазмообразующих систем. Это становится возможным в силу того, что эти системы весьма близки между собой физически и конструктивно.

Ранее [5, 6] сообщалось о запатентованных решениях по созданию разделительных устройств на основе ППР и ОР. Описание одного из вариантов ППР устройства с равномерным распределением плотности рабочего вещества и соответственно плотности плазмы вдоль инжекционного тракта электронного пучка и продольной оси магнитного поля приведено в [4, 7-10]. Поскольку в основе этих разделительных устройств лежат различные физические механизмы их реализации, то они естественно будут иметь различную эффективность в зависимости от параметров плазмы и разрядов. Так, например, разделительные устройства на основе ППР могут быть более выгодными при плотностях $10^{13} \dots 10^{15} \text{ см}^{-3}$, так как в более плотных средах эффективнее торможение электронного пучка. Кроме того, в таких системах возможно достижение рекуперативного эффекта для электронного пучка вследствие градиента плотности рабочего вещества вдоль инжекционного тракта. При этом распределение плотности разделяемого вещества должно изменяться по некоторому периодическому закону с запрограммированным затуханием (уменьшением) амплитуды, т. е. плотности и количества частиц в каждой пучности (максимуме) распределения. Посколь-

ку вариант разделительного устройства на основе ППР рассматривался ранее [4, 7-10], то остановимся на рассмотрении варианта разделительного устройства на основе разряда с осциллирующими электронами (Пеннинга) и проведем оценки его параметров.

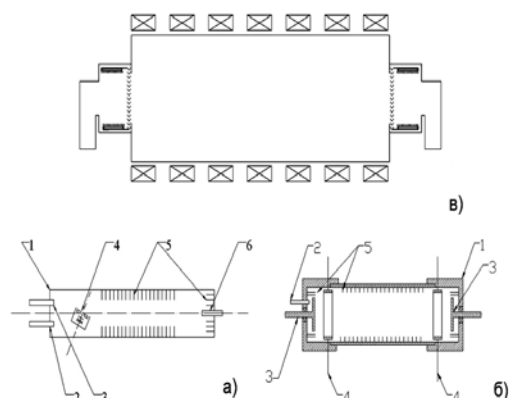


Рис. 1. Вариант устройства для разделения вещества, создаваемого по модульному принципу его построения со сменными ПОС:

- а – ПОС типа ППР: 1 – вакуумная камера, 2 – узел подачи разделяемого вещества, 3 – узел подачи поджигающего газа, 4 – электронная пушка, 5 – приемные пластины, 6 – коллектор пучка;
- б – ПОС типа ОР: 1 – вакуумная камера, 2 – узел подачи поджигающего газа, 3 – катод, 4 – анод, 5 – приемные пластины;
- в – основной модуль

Существует много способов создания разделяемой плазмы (другими словами, так называемой сепарационной плазмы). По литературным данным [11-13] при изучении ее свойств выполняется значительный объем расчетно-экспериментальных исследований по большому числу параметров (до 20 наименований). К ним следует отнести следующие: плотность плазмы, ее временной ход, пространственное распределение плотности, степень ионизации и состав плазмы, скорость и частота вращения плазменных слоев, время существования плазмы, скорость ионизации и состав различных газометаллических смесей (плазм), времена ионизации металлических атомов и их диффузии, напряженность радиального электрического поля в плазменных слоях, поток излучения из плазмы и мощность потерь на излучение, коэффициент распыления и массовый расход катодного вещества, массовый приход осаждаемого плазменного вещества на боковые приемные пластины, коэффициент разделения частиц газометаллической плазмы, атомарный состав разделяемого вещества и осажденного на приемных пластинах, скорость распада плазмы, частота соударений и коэффициенты элементарных атомных процессов (рекомбинация, диффузия). В этот перечень необходимо также для полноты информации включить требуемые величины некоторых параметров разделяемой плазмы согласно современной концепции ее образования и создания устройства для разделения вещества на массовые группы и элементы, а именно: скорость вращения плазмы порядка

10^6 см/с; концентрацию частиц плазмы 10^{14} см⁻³; производительность создаваемого устройства $\sim 1,5 \cdot 10^3$ т/год; коэффициент разделения на отдельных стадиях технологического процесса $10^2 \dots 10^6$ при больших разностях разделяемых масс (25 а.е.м.). Естественно, что исследование свойств разделяемой плазмы при таком количестве параметров (около 20), подлежащих исследованию, потребует достаточно больших аппаратных и временных затрат. Поэтому возникает необходимость оптимизации процесса исследования свойств разделяемой плазмы как по количеству исследуемых параметров, так и по объему получаемой информации, по которым можно судить о пригодности тех или иных предложений для достижения намеченной цели.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ РАЗДЕЛЯЕМОЙ ПЛАЗМЫ

Описание установки МАКЕТ, на которой производилось исследование процесса образования многокомпонентных газометаллических плазм (H_2+Ti , $Ar+Ti$, $Kr+Xe+Ti$) и определение их параметров, приведено в [14-19]. Основные характеристики этой установки, представляющей собой импульсный разряд с осциллирующими электронами (Пеннинга), приведены в табл. 1, где U_d , I_d , t_d , E_d – напряжение, ток, длительность, энергия разряда; B , t_B , U_B , E_B – индукция и длительность импульса магнитного поля пробочной конфигурации, напряжение и энергосодержание емкостного накопителя магнитной системы; R – пробочное отношение; P – рабочее давление; \varnothing_k – диаметр катодов. На рис. 2 изображена схема экспериментальной установки МАКЕТ.

Таблица 1

Параметры	Значения
U_d , кВ	$\leq 4,6$
I_d , кА	≤ 2
t_d , мс	~ 1
E_d , кДж	≤ 6
B , Тл	$\leq 0,9$
t_B , мс	18
U_B , кВ	≤ 3
E_B , кДж	≤ 7
R	1,25
P , Па	0,133...4,7
\varnothing_k , см	10

В табл. 2 приведены сведения о методах и средствах диагностики образуемой плазмы. Отметим, что вопросы диагностики разделяемой плазмы обсуждались ранее в [7, 19], где производилось ее разделение на две части: физическую и техническую или технологическую. Данный анализ методов и средств диагностики является продолжением ранее обсуждавшихся аспектов диагностики разделяемой плазмы.

Перечисленные методики и средства диагностики, используемые в эксперименте, условно можно разделить на основные группы, формируемые по плазменно-параметрическим характеристикам: 1 – определение плотности и ее пространственных профилей; 2 – определение уровня турбулентных

пульсаций плазмы; 3 – определение энерготепловых характеристик и ионизационно-массовых состояний частиц плазмы; 4 – измерение выделенных ионных потоков и массовых расходов рабочего (распыляемого – в случае использования распылительного механизма подачи рабочего вещества в разряд) и разделяемого веществ.

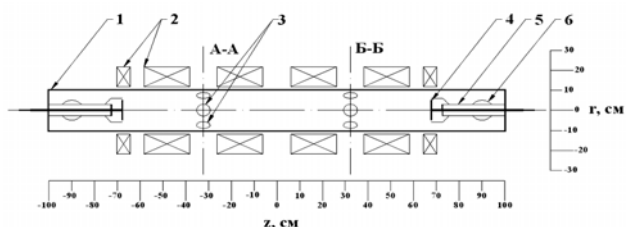


Рис. 2. Схематическое изображение экспериментальной установки МАКЕТ: 1 – разрядная камера (анод); 2 – магнитная система; 3 – диагностические порты; 4 – катоды; 5 – изолятор; 6 – система вакуумной откачки; А-А, Б-Б – сечения диагностических портов

Менее отработанными и исследованными к настоящему времени являются плазменно-параметрические характеристики разряда и образованной плазмы, относящиеся к четвертой группе. Попутно отметим, что концепция создания технологий и устройств магнитоплазменного разделения вещества на массовые группы и элементы требует также исследования как движения заряженных частиц в различных конфигурациях магнитных полей, так и определения действующих механизмов разделения [20]. Относительно экспериментов, проводимых на установке МАКЕТ, информация по этим вопросам предоставлялась ранее [15, 17, 18].

Таблица 2

Метод, средство	Волновая характеристика	Погрешность измерений
1. Затухание и отсечка СВЧ-сигнала	$\lambda = 8, 4, 2$ мм	–
2. СВЧ-интерферометрия плазмы	$\lambda = 8, 4, 2$ мм	$\pm 10 \dots 20\%$
3. СВЧ-рефлектометрия плазмы	$\lambda = 8, 4$ мм	$\pm 2 \dots 30\%$
4. СВЧ-флуктуационная рефлектометрия	$\lambda = 8, 4$ мм	$\pm 2 \dots 30\%$
5. Оптическая спектроскопия	$\lambda = 320 \dots 680$ нм	–
6. Фоторегистрация потока излучения	$\lambda = 180 \dots 1100$ нм	–
7. Зондовые измерения	–	–
8. Рентгенофлюоресцентный анализ	$\lambda < 10$ нм	–
9. Токовые измерения	–	–

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Как было сказано выше, проведение так называемого условно экспресс-анализа различных способов создания разделяемой плазмы на пригодность их к практическому использованию при создании разделительных устройств является востребованным и необходимым. Поэтому с целью оптимизации процесса исследования свойств разделяемой плазмы предлагается разделить группу отобранных для экспериментального определения параметров на две части: параметры первой и второй очереди. Таким образом, из всего многообразия исследуемых параметров (~ до 20) можно выделить несколько (около 5) обязательных, по которым можно судить о пригодности тех или иных предложений для достижения намеченной цели. Другие параметры могут быть исследованы во вторую очередь. Это позволит снизить высокую экспериментальную нагрузку при проведении начальных исследований и уменьшить материально-технические затраты. К параметрам первой очереди при исследовании разделительной плазмы следует отнести: плотность плазмы; распределение плотности плазмы по радиусу системы; скорость вращения плазмы заданной плотности; элементный и зарядовый составы плазмы; напряженность радиальной составляющей электрического поля в плазме. Характеристические признаки и особенности обязательных (первоочередных) параметров обобщены и приведены в табл. 3.

Таблица 3

Название параметра	Методика его определения (одна из возможных)	Диапазон измененных значений, полученных на установке МАКЕТ
Плотность плазмы	СВЧ-интерферометрия	$10^{13} \dots 10^{14} \text{ см}^{-3}$
Распределение плотности плазмы по радиусу	СВЧ-рефлектометрия	$N_p(r) = N_{\max} \left[1 - \left(r/r_{\max} \right)^\gamma \right]$ $\gamma = 2 \dots 10$
Скорость вращения плазмы заданной плотности	СВЧ-корреляционная рефлектометрия	$2 \cdot 10^5 \dots 10^6 \text{ см/с}$
Элементный и зарядовый состав плазмы	Эмиссионная оптическая спектроскопия	$z_i \approx 1,$ $\text{Ti}^+, \text{H}^+, \text{Ar}^+, \text{Kr}^+, \text{Xe}^+$
Напряженность радиальной составляющей электрического поля в плазме	СВЧ-корреляционная рефлектометрия	$1,3 \dots 90 \text{ В/см}$

Как видно из представленных данных, проведенные измерения и анализ полученных результатов показывают, что ряд обязательных параметров (N_p , $N_p = f(r)$, v_ϕ , $z_i = 1$) исследуемой многокомпонентной газометаллической плазмы соответствует контролю

ным значениям современной концепции создания устройства для разделения вещества на массовые группы и элементы.

В ряде литературных источников, например в [21], указывалось на то, что в проводимых работах недостаточно внимания было уделено проблеме немоноэнергетических ионов вещества, находящегося в плазменном состоянии и подлежащего разделению, а также влиянию многозарядных ионов на процесс разделения. Интерес к этим вопросам связан с тем, что и то, и другое влияет на качество разделения частиц по массам. Так, согласно [22] скорость вращения и параметр $\Theta = mv_\phi^2/2T$, зависящий от ее значения, где v_ϕ – азимутальная скорость и T – температура плазмы, в значительной мере определяют коэффициент разделения, который пропорционален $\exp \Theta$. При этом для двукратно заряженных ионов они (v_ϕ и Θ) оказались больше, чем для однократно ионизованных, при незначительном (порядка 20%) увеличении температуры. Измерения, проведенные для плазм с двукратно ионизованными ионами Ag^{2+} , Kr^{2+} , Xe^{2+} , показали, что в этом случае величина параметра Θ увеличивается в среднем соответственно на 12, 65 и 87%, что, в свою очередь, должно привести к изменению коэффициента разделения. Изменение фиксированных параметров разряда и плазмы приведены в табл. 4 для однозарядных (индекс II) и двузарядных (индекс III) ионов Ag, Kr, Xe.

Таблица 4

Газ и сорт ионов	Ag II/ Ag III		Kr II/ Kr III		Xe II/ Xe III	
	0,4	0,7	0,4	0,7	0,4	0,7
B , Тл	0,4	0,7	0,4	0,7	0,4	0,7
v_ϕ , км/с	16,5/ 20,5	20/ 25	9/ 13,5	17,5/ 18,5	6,25/ 10	7,25/ 11
T , эВ	9,5/ 14	9,5/ 14	19/ 20	19/ 20	21,5/ 22,5	21,5/ 22,5
Θ	6/ 6,75	8/ 9	1,75/ 3,5	5/ 6,5	1,35/ 2,75	1,7/ 2,85

ВЫВОДЫ

Показана возможность оптимизации процесса исследования свойств разделяемой плазмы за счет дифференциации набора исследуемых параметров плазмы и выделения группы обязательных (первоочередных) параметров, отвечающих требованиям современной концепции образования разделяемой плазмы и создания устройств для разделения вещества на массовые группы и элементы.

Экспериментально показано, что достигнутые значения обязательных параметров (первой очереди) в значительной степени соответствуют требованиям современной концепции образования разделяемой плазмы и создания устройств для разделения вещества на массовые группы и элементы, в частности, по значениям плотности плазмы, радиальных профилей, скорости вращения и зарядового состояния частиц плазмы.

Впервые сделан важный вывод о том, что модульный принцип построения разделительного устройства допускает взаимозаменяемость плазмообразующих систем различного типа, но достаточно

близких между собой физически и конструктивно, например, плазмообразующих систем на физических принципах пучково-плазменного и отражательного разрядов, а также замену их однотипными по мере выработки ресурса или при возникновении неисправностей, не подлежащих оперативному исправлению.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. A.J. Fetterman, N.J. Fish. Plasma mass filters for nuclear waste reprocessing // *Princeton Plasma Physics Laboratory PPPL-4627*. Princeton, 2011, 8 p.
2. Ю.В. Ковтун, Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов. Системы с самовозбуждением ВЧ-колебаний для создания, нагрева и сепарации многокомпонентной плазмы // *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна №794. Серія фізична «Ядра, частинки, поля»*. 2008, в. 1(37), с. 115-120.
3. Е.И. Скибенко, Ю.В. Ковтун, А.И. Скибенко, А.М. Yegorov, V.B. Yuferov. Peculiarities in the of separating devices in a new physical trend for separation of spent nuclear fuel and radioactive waste // *3 International Conference Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy*, June 7-12, 2010, Kyiv, Ukraine: Book of abstracts. 2010, p. 130.
4. Е.И. Скибенко, Ю.В. Ковтун, А.М. Егоров, В.Б. Юферов. Разделение вещества на элементы, основанное на физических принципах пучково-плазменного и отражательного разрядов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2011, №2(72), с. 141-148.
5. Патент UA №24729 от 10.07.2007 / Е.И. Скибенко, Ю.В. Ковтун, В.Б. Юферов // *Бюл. №10*. 2007.
6. Патент UA 38780 от 12.01.2009 / Е.И. Скибенко, Ю.В. Ковтун, А.И. Скибенко, В.Б. Юферов // *Бюл. №1*. 2009.
7. Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов, Ю.В. Ковтун. Концептуальный проект плазменного источника на основе пучково-плазменного разряда для сепарационных технологий // *Сборник докладов ОТТОМ-8*. Харьков, 2007, т. 1, с. 232-238.
8. Ю.В. Ковтун, Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов. Действующие и разрабатываемые магнитоплазменные сепараторы для разделения вещества на элементы и их изотопы // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2008, №2(92), с. 149-154.
9. А.М. Yegorov, Е.И. Skibenko, Yu.V. Kovtun, V.B. Yuferov. Magneto plasma separation as a method for reprocessing of spent fuel and radioactive waste // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Physics of Plasma»*. 2008, №6, p. 147-149.
10. Е.И. Скибенко. Физико-технические аспекты создания устройств магнитоплазменного разделения вещества на элементы и их изотопы на основе пучково-плазменного разряда // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2009, №6(64), с. 67-85.
11. О.Н. Фейгенсон. *Разработка и исследование высокочастотного плазматрона и стенд для*

переработки промышленных отходов: Автореф. дис. Санкт-Петербург, 2002, 18 с.

12. Во Ныи Зан. *Плазмооптические масс-сепараторы: методы построения, диагностика*: Автореф. дис. Иркутск, 2012, 23 с.

13. Yu.V. Kovtun. *Dense multicomponent gas-metal reflex-discharge plasma*: Ph. D. thesis. Kharkov, 2012, 19 p.

14. А.И. Скибенко, Ю.В. Ларин, А.В. Прокопенко и др. Создание и исследование имитационной плазмы на тяжелых газах и парах металлов в импульсном отражательном разряде для сепарационных технологий // *Вестник НТУ ХПИ. Серия «Техника и электрофизика высоких напряжений»*. 2007, №34, с. 104-111.

15. Yu.V. Kovtun, A.I. Skibenko, E.I. Skibenko, et al. Study of multicomponent plasma parameters in the pulsed reflex discharge // *Ukrainian Journal of Physics*. 2010, v. 55, №12, p. 1269-1277.

16. Yu.V. Kovtun, A.I. Skibenko, E.I. Skibenko, et al. Experiment on the production and separation of the pulsed reflective discharge gas-metal plasma // *Technical Physics*. 2011, v. 56, №5, p. 623-627.

17. Ю.В. Ковтун, Е.И. Скибенко, А.И. Скибенко, В.Б. Юферов. Количественные оценки массового расхода распыляемого и разделяемого веществ-

ва в импульсном отражательном разряде // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2011, №6(76), с. 85-91.

18. Yu.V. Kovtun, E.I. Skibenko, A.I. Skibenko, V.B. Yuferov. Rotation of plasma layers with various densities in crossed E×B fields // *Ukrainian Journal of Physics*. 2013, v. 58, № 5, p. 450-457.

19. Ю.В. Ковтун, Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов. Магнітоплазмові сепараційні технології і їх можливе використання для переробки ВЯП і РАВ // *Ядерні та радіаційні технології*. 2007, т. 7, №1-2, с. 72-80.

20. И.Н. Онищенко. О механизме сепарации ионов плазмы, инжектируемой в скрещенные E×H-поля // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2012, №4(80), с. 108-111.

21. В.М. Бардаков, Во Ныи Зан, Н.А. Строкин. Панорамная плазмооптическая масс-сепарация многоэнергетических и многозарядных ионов // *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2012, №2, с. 132-142.

22. В.Р. Болдырев, Н.П. Полуэктов, В.Н. Харченко. Экспериментальное исследование динамики процессов в импульсной плазменной центрифуге // *Физика плазмы*. 1985, т.11, №4, с. 425-429.

Статья поступила в редакцию 25.09.2013 г.

ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ ПЛАЗМИ, ЩО РОЗДІЛЯЄТЬСЯ, УТВОРЕНОЇ В РОЗРЯДІ З ОСЦИЛЮЮЧИМИ ЕЛЕКТРОНАМИ (ПЕННІНГА)

Е.І. Скібенко, Ю.В. Ковтун, А.І. Скібенко, В.Б. Юферов

За результатами виконаних розрахунків і експериментів проведена оптимізація вибору параметрів плазми, що розділяється, утвореної в розряді з осцилюючими електронами (Пеннінга) з метою скорочення їх кількості та спрощення початкової стадії дослідження її властивостей.

ESTIMATIONS OF PARAMETERS OF SEPARATION PLASMA PRODUCED IN THE DISCHARGE WITH OSCILLATING ELECTRONS (PENNING)

E.I. Skibenko, Yu.V. Kovtun, A.I. Skibenko, V.B. Yuferov

The results of previous calculations and experiments were used to optimize the choice of parameters of the separation plasma formed in the discharge with oscillating electrons (Penning) in order to reduce their quantity and to facilitate the initial stage of plasma property investigations.