ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2027, № 1

ЛАБОРАТОРНАЯ

ТЕХНИКА

УДК 533.582

ИОННО-ГЕТТЕРНЫЕ НАСОСЫ С СИЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

©2027 г. А. М. Семенов*

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера

Сибирского отделения Российской академии наук

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева,11

Новосибирский государственный технический университет

Россия, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

**E-mail: A.M.Semenov@inp.nsk.su*

Поступила в редакцию 18.06.2026

После доработки 06.10.2026

Принята к публикации 27.10.2026

В ИЯФ СО РАН были созданы и протестированы прототипы магниторазрядных насосов с сильным (до 0.3 Тл) магнитным полем с диаметрами анодных ячеек 7.6 или 12 мм и длинами ячеек 10 или 14 мм. Важным преимуществом насосов с сильным магнитным полем и малым диаметром анодных ячеек является то, что можно увеличить скорость откачки насоса за счет размещения большего количества ячеек. Экспериментальные результаты измерения скорости откачки насосов оказались близки к теоретической оценке. Представлены расчеты максимального магнитного поля и скорости откачки для одной ячейки для анодных ячеек различных диаметров, а также приведено описание конструкций насосов и результаты измерений зависимости скорости откачки и тока разряда от давления.

Ключевые слова: магниторазрядный насос, геттер, скорость откачки

1. ВВЕДЕНИЕ

Бурному развитию вакуумной техники поспособствовало решение проблем управляемого термоядерного синтеза, где необходимо было обеспечить скорость откачки от 100 до 1000 $м^3/с$. С этой целью были созданы сорбционные насосы, принцип действия в которых основан на поглощении активных газов (водорода, азота, монооксида углерода и т.д.) специальными геттерами за счет хемосорбции. Главным недостатком такого типа насосов является то, что, как было сказано выше, они откачивают только активные газы, но не способны поглощать метан и благородные газы, т.е. присутствующий в атмосфере аргон. Для этого необходимо использовать дополнительные насосы, такие как турбомолекулярные или ионно-геттерные.

В магниторазрядных (или ионно-геттерных) насосах происходит интенсивное распыление титана, из которого изготовлены катоды, но они насосы существенно отличаются от сорбционных тем, что, во-первых, распыление в них происходит за счет бомбардировки холодных катодов ионами остаточного газа с энергией в несколько (3–7) кэВ, а во-вторых, источниками электронов, необходимых для ионизации остаточного газа, являются ячейки Пеннинга [1]. Поскольку ток разряда, а следовательно, и скорость распыления катодов, прямо пропорциональны давлению, достигается более экономичное расходование катодов. Другое преимущество ионно-геттерных насосов состоит в том, что они “вакуумно-изолированы”, т.е. при внезапном отключении электропитания в вакуумную систему не поступает воздух из атмосферы.

В настоящее время ни в одном лептонном ускорителе невозможно получение вакуума без применения ионно-геттерных насосов. Ввиду низкой молекулярной проводимости вакуумных камер и ограниченности пространства для размещения насосов требуется создание таких магниторазрядных насосов, чтобы при сохранении тех же габаритов они обладали большей скоростью откачки. Одним из таких решений может быть применение сильного магнитного поля (величиной до 0.3 Тл).

В настоящей статье представлены расчеты максимального магнитного поля и скорости откачки для одной ячейки для анодных ячеек различных диаметров, а также описание конструкций насосов и результаты измерений зависимости скорости откачки и тока разряда от давления.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ

На рис. 1 представлен стенд для вакуумных испытаний магниторазрядных насосов, выполненный в соответствии с Международным стандартом ISO DIN 3556 [2]. Установка содержит два вакуумных объема: в первом устанавливается испытываемый насос SIP, во второй осуществляется подача газа. Диаметр D каждого вакуумного объема равен 150 мм, а длина $(3/2)D$, т. е. 225 мм. Измерители вакуума устанавливаются на расстоянии $(1/2)D$ от верхнего фланца в каждом объеме.

Рис. 1. Стенд для вакуумных испытаний магниторазрядных насосов

В каждой части установки имеется по одному датчику давления с горячим катодом типа Extractor (IG1 или IG2), способному проводить измерения в диапазоне давлений от $2\cdot10^{-12}$ до 10^{-5} торр и датчику давления с холодным катодом (CG_1 или CG_2), работающему в диапазоне давлений от 10^{-11} до 10^{-5} торр. Масс-спектрометр RGA необходим для контроля подаваемого газа и спектра остаточных газов, он установлен в объеме с исследуемым магниторазрядным насосом.

Входной фланец для инжекции газа располагается на расстоянии (1/2)*D* относительно верхнего фланца вакуумного объема. Внутренняя трубка имеет диаметр 8 мм и длину (1/2)*D*, она направлена в сторону нижнего фланца, как показано на рис. 1. Подача газа осуществляется через прогреваемый цельнометаллический ручной щелевой натекатель фирмы Varian (не показан на рис. 1).

Предварительная откачка осуществляется через цельнометаллический ручной угловой клапан Ду 63 с фланцами типа Conflat, последовательно соединенными с турбомолекулярным насосом со скоростью откачки 80 л/с по азоту и форвакуумным спиральным насосом со скоростью откачки 10 м^3/ч.

Поток газа, откачиваемый насосом, определяется методом двух датчиков давления через отверстие с известной молекулярной проводимостью:

$$Q = C(P_2 - P_1), \quad (1)$$

где Q [л·торр/с] – поток газа, поступающего к исследуемому насосу, P_2 и P_1 [торр] – давление в вакуумном объеме, куда поступает газ, и в вакуумном объеме с исследуемым насосом соответсвенно, C [л/с] – теоретически вычисленная молекулярная проводимость отверстия.

Молекулярная проводимость подбирается таким образом, чтобы перепад давлений составлял примерно один порядок, в данном случае используется отверстие круглого сечения с диаметром 6 мм и толщиной 3 мм.

Для того чтобы гарантировать молекулярный режим течения газа через отверстие, давление в вакуумном объеме, где инжектируется газ, не должно превышать значения $3.76 \cdot 10^{-3}/d$, где d [мм] – диаметр отверстия,

С учетом коэффициента Клаузинга молекулярная проводимость отверстия C равняется 2.21 л/с для азота и 1.84 л/с для аргона.

До проведения измерений вакуумные объемы стенда и испытываемый насос прогревались при температуре порядка 400 °C в течение 72 ч, поэтому газовыделением со стенок стенда и насоса можно пренебречь. Скорость откачки магниторазрядного насоса может быть вычислена следующим образом:

$$S = \frac{C\,(P_2 - P_1)}{P_1}, \quad (2)$$

где S [л/с]– скорость откачки насоса.

Если же измерение скорости откачки происходит вблизи предельно достижимого в системе вакуума, то измеренное значение может отличаться от истинного в несколько раз. Тогда истинная скорость откачки вблизи предельного вакуума определяется следующей формулой:

$$S_{\text{ист}} = S\left(\frac{P_1}{P_1 - P_{1,\text{пред}}}\right), \quad (3)$$

где $P_{1,\text{пред}}$ – предельное давление в верхнем объеме до инжекции газа.

3. ОПИСАНИЕ ПРОТОТИПОВ МАГНИТОРАЗРЯДНЫХ НАСОСОВ С СИЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Магниторазрядные насосы (BINP #1 – BINP #8) производства ИЯФ СО РАН (рис. 2) относятся к диодному типу [3]. Диаметр анодной ячейки составляет 12 или 7.6 мм. Длина ячейки равна 14 или 10 мм. Зазор между анодом и катодом составляет 4 или 6 мм, а количество таких ячеек равно 36 (для диаметра 12 мм) или 95 (для диаметра 7.6 мм). Полные размеры анодного блока: ширина 120 мм, длина 54 мм. Величина магнитной индукции составляет 0.12 или 0.28 Тл. Катодом являются титановые пластины толщиной 1 мм каждая, марка титана ВТ1-0 или ВТ1-00. В табл. 1 приводятся параметры для каждого насоса. Магнитное поле величиной 0.12 Тл обеспечивается магнитотвердыми анизотропными ферритами, а величиной 0.3 Тл – сплавов неодим-феррум-бор.

Рис. 2. Диодный магниторазрядный насос с сильным магнитным полем

Таблица 1. Основные параметры диодных магниторазрядных насосов с габаритами анодного блока 120×54 мм^2 и напряжением U_a = 4 кВ

Название насоса	Диаметр ячейки d, мм	Длина ячейки h, мм	Зазор между анодом и катодом b, мм	Количество ячеек	Магнитное поле B, Тл
BINP #1	12	14	4	36	0.12
BINP #2	12	14	4	36	0.28
BINP #3	7.6	14	4	95	0.12
BINP #4	7.6	14	4	95	0.28
BINP #5	7.6	10	6	95	0.12
BINP #6	7.6	10	6	95	0.28
BINP #7	7.6	10	4	95	0.12
BINP #8	7.6	10	4	95	0728

4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СКОРОСТИ ОТКАЧКИ

Поскольку скорость откачки магниторазрядных насосов прямо пропорциональна току разряда, при выборе тех или иных параметров насосов (длина и диаметр анодной ячейки, зазор между анодом и катодом и т.д.), а также потому, что непосредственное измерение скорости откачки насосов представляется довольно трудоемким и дорогостоящим, целесообразно провести предварительные теоретические расчеты скорости откачки для каждого типа насоса. Работы [4, 5], посвященные теории разряда Пеннинга при выводе аналитических формул зависимости скорости откачки от параметров разряда, исходят из постоянства величины отрицательного объемного заряда при изменении давления и интенсивности разряда. Это не подтверждается экспериментом, особенно в области сверхвысокого вакуума (при давлениях 10^{-10}–10^{-8} торр).

Несмотря на попытки специалистов создать теорию разряда с осциллирующими электронами (разряда Пеннинга), общей теории разряда, с помощью которой можно было бы рассчитывать зависимости разрядного тока от физических параметров в широком диапазоне давлений, не существует. Это объясняется сложностью процессов, происходящих в разряде, существованием различных форм разряда, сильно отличающихся друг от друга величиной и распределением отрицательного объемного заряда, изменением средней энергии ионов и их распределением по поверхности катода, изменением вторично-эмиссионных процессов по мере изменения давления остаточных газов.Тем не менее для расчетов скорости откачки одной ячейки использовались формулы из [6]. В табл. 1 приведены основные параметры тестируемых магниторазрядных насосов.

Теоретические значения скорости откачки находятся следующим образом.

При $B_Z \le B \le 2B_z$ где

$$B_Z = \frac{6 \cdot 10^{-4}}{d}$$

– пороговая величина магнитного поля, соответствующая “зажиганию” газового разряда, скорость откачки одной ячейки по азоту равна

$$S = 1.56 \cdot 10^9 \left(1 - \frac{1.5 \cdot 10^6 P}{1+4 \cdot 10^6 P}\right) P^{0.2} h d^2 B_Z (B - B_Z). \quad (4)$$

При $2B_Z \le B \le B_{\max}$ где

$$B_{\max} = B \frac{15.26 \cdot 10^{-6} \sqrt{U_a}}{d\, P^{0,05}}$$

– максимальное магнитное поле, при котором достигается максимальная скорость откачки ячейки, она может быть найдена по формуле

$$S = 3.9 \cdot 10^{10} \left(1 - \frac{1.5 \cdot 10^6 \cdot P}{1+4 \cdot 10^6 \cdot P}\right) P^{0.2} h d^2 B^2. \quad (5)$$

При $B \ge B_{\max}$ имеем

$$S = 9.1 \cdot 10^{-2} \left(1 - \frac{1.5 \cdot 10^6 P}{1+4 \cdot 10^6 \cdot P}\right) P^{0.1} h U_a \left(1 - \frac{1.05 \cdot 10^7 \cdot \sqrt{(B - B_{\max}) dP}}{U_a}\right). \quad (6)$$

Полная скорость откачки всего насоса может быть найдена следующим образом:

$$S_n = SN, \quad (7)$$

где N – число ячеек.

Как видно на рис. 3, чем меньше диаметр анодной ячейки, тем больше должна быть максимальная величина магнитного поля. Для ячеек диаметром больше 12 мм достаточно иметь магнитное поле в центре ячейки, равное 0.12 Тл. Для ячеек диаметром 8 мм уже требуется 0.3 Тл при давлении 10^{-7} торр которое соответствует требуемой максимальной скорости откачки по азоту.

Рис. 3. Определение максимального магнитного поля для различных значений диаметра анодной ячейки

Зависимость скорости откачки одной ячейки от диаметра данной ячейки при различных длинах анодных ячеек показана на рис. 4. Чем больше диаметр анодной ячейки, тем больше скорость откачки. Но нужно помнить, что в насосе располагается не одна ячейка, а десятки и даже сотни. Рассмотрим случай магниторазрядных насосов производства ИЯФ СО РАН. При диаметре ячеек, равном 12 мм, можно разместить не более 36 таких ячеек, тогда суммарная скорость откачки насоса (в упрощенном виде) будет порядка 36 л/с, в то время как ячеек диаметром 7.6 мм может быть расположено до 95, а значит, скорость откачки такого насоса будет около 50 л/с, что повышает быстродействие насоса примерно на 40% по сравнению с первым вариантом либо позволяет уменьшить габариты насоса при сохранении данной (36 л/с) скорости откачки.

Рис. 4. Зависимости скорости откачки (расчет) одной ячейки от диаметра анодной ячейки для различных магнитных полей и длин анодных ячеек

Необходимо также помнить про зазор между анодом и катодом, который существенно уменьшает эффективную скорость откачки насоса.

На рис. 5. представлена схема магниторазрядного насоса, где показаны все размеры, необходимые для расчета его эффективной скорости откачки.

Рис. 5. Схематическое изображение магниторазрядного насоса

В итоге эффективная скорость откачки может быть найдена следующим образом:

$$S_{\text{eff}} = \sqrt{S_n U} \cdot \text{th}\left(\sqrt{S_n / U}\right), \quad (9)$$

где S_{eff} – эффективная скорость откачки насоса, U [л/с] – молекулярная проводимость канала (зазора между анодом и катодом)

$$U = 3.64 \frac{a^2 b}{l} \ln \frac{l}{a} \sqrt{\frac{T}{M}}, \quad (10)$$

где T[К] – температура газа, M[кг/кмоль] – молярная масса газа.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Точность измерения определяется погрешностью датчиков давления и равняется ±10% для датчика давления с горячим катодом и ±30% для датчика давления с холодным катодом.

Конструкция насоса у BINP #1 и BINP #2 одна и та же, за исключением магнитной системы, которая является съемной частью, и данный насос находится в насыщенном состоянии. Скорость откачки диодных насосов по аргону составляет около одного процента от максимального значения по азоту, поэтому провести измерения скорости откачки по аргону для обоих магниторазрядных насосов BINP #1 и BINP #2 с хорошей точностью не представляется возможным. Таким образом, можно измерить только скорость откачки по азоту в насыщенном состоянии.

Для увеличения скорости откачки при сохранении габаритов насоса было предложено заменить диаметр анодной ячейки с 12 до 7.6 мм, тем самым количество ячеек можно увеличить почти в 3 раза. Корпус насоса, а также катоды были взяты из насоса BINP #1, длина ячейки равнялась 10 мм или 14 мм. Экспериментальные результаты зависимости скорости откачки по азоту и тока разряда от давления для магниторазрядных насосов с диаметрами ячейки 12 и 7.6 мм представлены на рис. 6 и. 7 соответственно [7]. В табл. 2 представлены экспериментальные данные и теоретический расчет максимальных значений скорости откачки для различных магниторазрядных насосов. Как следует из табл. 2, расхождение между расчетом и экспериментом составляет примерно 50% по некоторым насосам, что может быть объяснено допущениями в теории разряда, связанными с существованием различных форм разряда, сильно отличающимся друг от друга как по величине, так и по распределению отрицательного объемного заряда, изменением средней энергии ионов и их распределением по поверхности катода и многими другими факторами.

Таблица 2. Экспериментальные данные скорости откачки магниторазрядных насосов (максимальные значения)

Название	Скорость откачки, л/с	
	Расчет	Эксперимент
BINP #1	15	17
BINP #2	23	19.5
BINP #3	15	10
BINP #4	55	35
BINP #5	14	12.5
BINP #6	52	32
BINP #7	14	10
BINP #8	53	35

Рис. 6. Зависимости скорости откачки по азоту

Рис. 7. Зависимости тока разряда

На скорость откачки магниторазрядного насоса влияют не только геометрические размеры электродного блока (диаметр и длина анодной ячейки, зазор между анодом и

катодом, величина магнитного поля и т.д.) или напряжение, подаваемое на анод или катод, но также и спектр остаточных газов.

В прогретой вакуумной системе доминирующими газами являются водород, содержание которого составляет 90%, и моноксид углерода, содержание которого равно 10%.

При подаче азота происходит выделение водорода из самого насоса, и соотношение водород/азот может достигать значения 2:1 или даже больше. Измеренная скорость откачки насоса меньше реальной, потому что вычленить составляющую водорода в измеренном давлении при помощи ионизирующего датчика давления не представляется возможным. Квадрупольный же масс-анализатор фирмы SRS обладает сильной нелинейностью как по разным газам, так и в различных диапазонах давления. По мере увеличения потока тестируемого газа данное соотношение уменьшается за счет тренировки поверхности разрядом и измеренная скорость откачки насоса становится больше по сравнению со скоростью откачки до тренировки. Поэтому для уменьшения выделения водорода при исследовании магниторазрядных насосов рекомендуется проводить предварительный прогрев вакуумной установки и насоса.

При подаче аргона можно наблюдать аналогичный эффект. Правда, помимо водорода, может выделяться и азот, который был поглощен при измерении скорости откачки насоса по азоту.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнена оценка величины максимального поля для различных диаметров и длин анодных ячеек; на основании полученных результатов были изготовлены прототипы магниторазрядных насосов, а также рассчитаны зависимости скорости откачки и тока разряда от давления. Получено, что для всех прототипов предельное давление ограничивается уровнем вакуума, равныым примерно 10^{-9} торр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 *Васильев Г.А.* Магниторазрядные насосы. Москва: Энергия, 1970.

2 ISO/DIS 3556-1.2. 1992. Sputter-ion pumps. Measurement of performance characteristics. Part 1. Pumps with a volume rate of flow greater than 10 l/s https://genorma.com/en/standards/iso-dis-3556-1-2

3 *Semenov A., Anashin V., Krasnov A.* AIP Conf. Proc. 2020. V. 2299. № 1. P. 020010. https://doi.org/10.1063/5.0030428

4 *Смирницкая Г.В., Рейхрудель Э.М.* ЖТФ. 1959. Т. 29. № 2. С. 153.

5 *Malev M.D., Trachtenberg E.M.* Vacuum. 1973. V. 23. № 11. P. 403. https://doi.org/10.1016/0042-207X(73)92530-X

6 *Hartwig H., Kouptsidis J.S.* J. Vac. Sci. Technol. A. 1974. V. 11. № 6. P. 1154. https://doi.org/10.1116/1.1318701

7 *Краснов А.А., Семенов А.М.* Труды конференции XXIX научно-технической конференции “Вакуумная наука и техника”. Крым, Судак, 2022. С. 63. https://elibrary.ru/item.asp ?id=50028247

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Стенд для вакуумных испытаний магниторазрядных насосов

Рис. 2. Диодный магниторазрядный насос с сильным магнитным полем

Рис. 3. Определение максимального магнитного поля для различных значений диаметра анодной ячейки при напряжении, равном 4 кВ

Рис. 4. Зависимости скорости откачки (расчет) одной ячейки от диаметра анодной ячейки для различных магнитных полей и длин анодных ячеек при магнитном поле, равном 0.3 Тл

Рис. 5. Схематическое изображение магниторазрядного насоса: *1* – анод, *2* – катоды, *3* – корпус насоса, *4* – магнит, *5* – входной фланец, *B* – магнитная индукция

Рис. 6. Зависимости скорости откачки по азоту от давления для различных магниторазрядных насосов с диаметрами анодной ячейки 12 и 7.6 мм

Рис. 7. Зависимости тока разряда от давления для различных магниторазрядных насосов с диаметрами анодной ячейки 12 и 7.6 мм

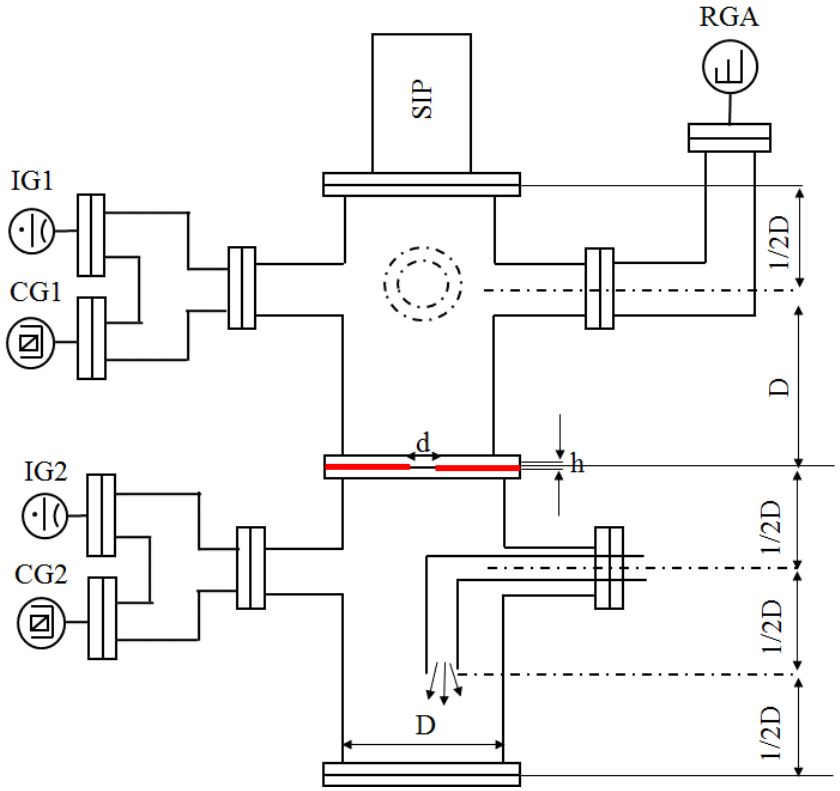


Рис. 1.



Рис. 2.

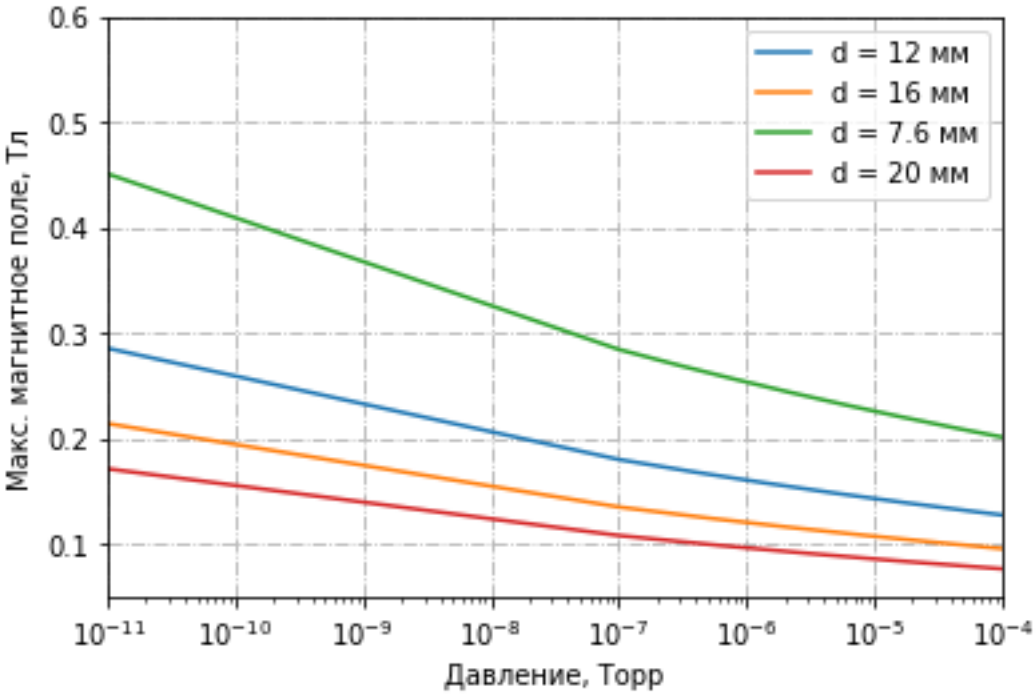

0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
Макс. магнитное поле, Тл
d = 12 мм
d = 16 мм
d = 7.6 мм
d = 20 мм
10^{-11}
10^{-10}
10^{-9}
10^{-8}
10^{-7}
10^{-6}
10^{-5}
10^{-4}
Давление, Торр

Рис. 3.

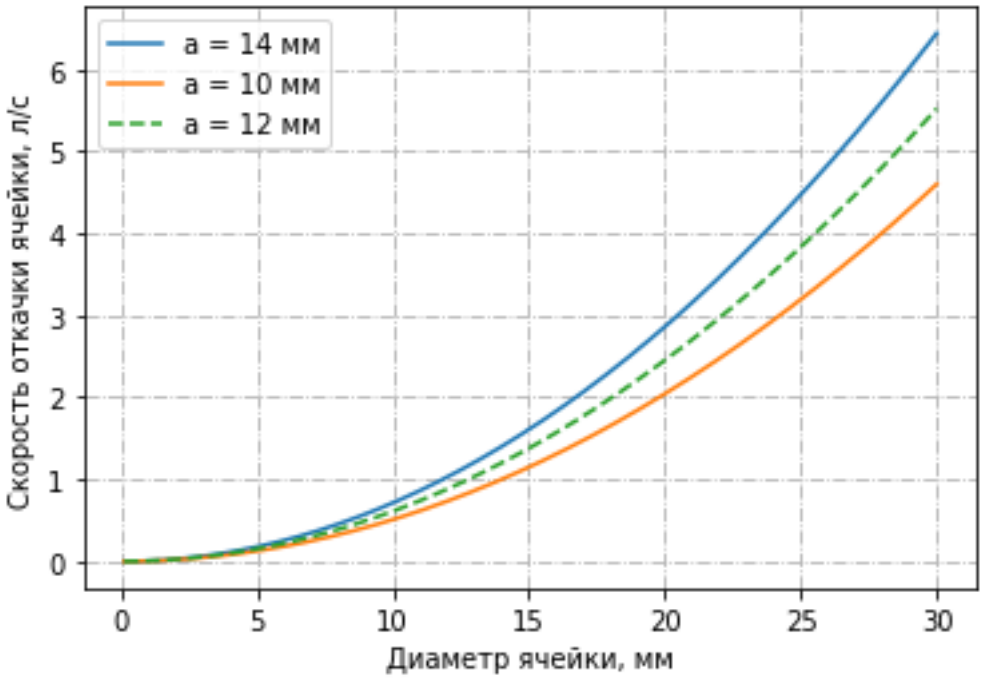

a = 14 мм
a = 10 мм
a = 12 мм
Скорость откачки ячейки, л/с
Диаметр ячейки, мм
0
1
2
3
4
5
6
0
5
10
15
20
25
30

Рис. 4.

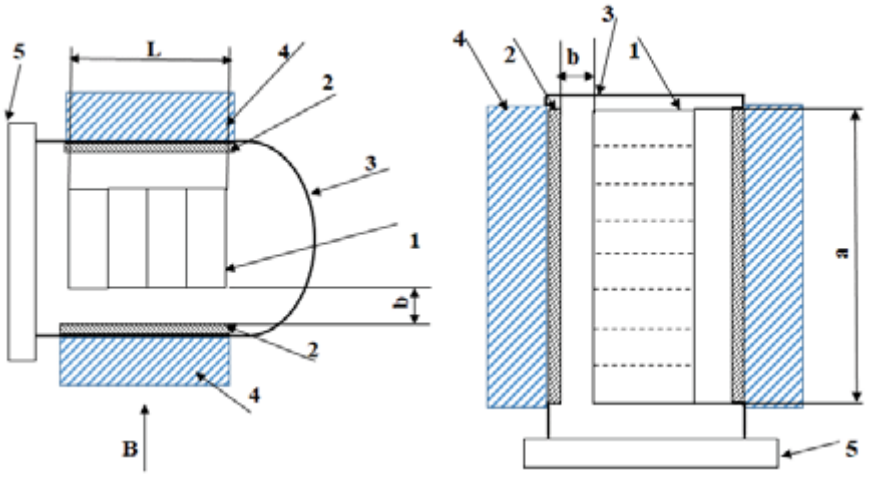


Рис. 5.

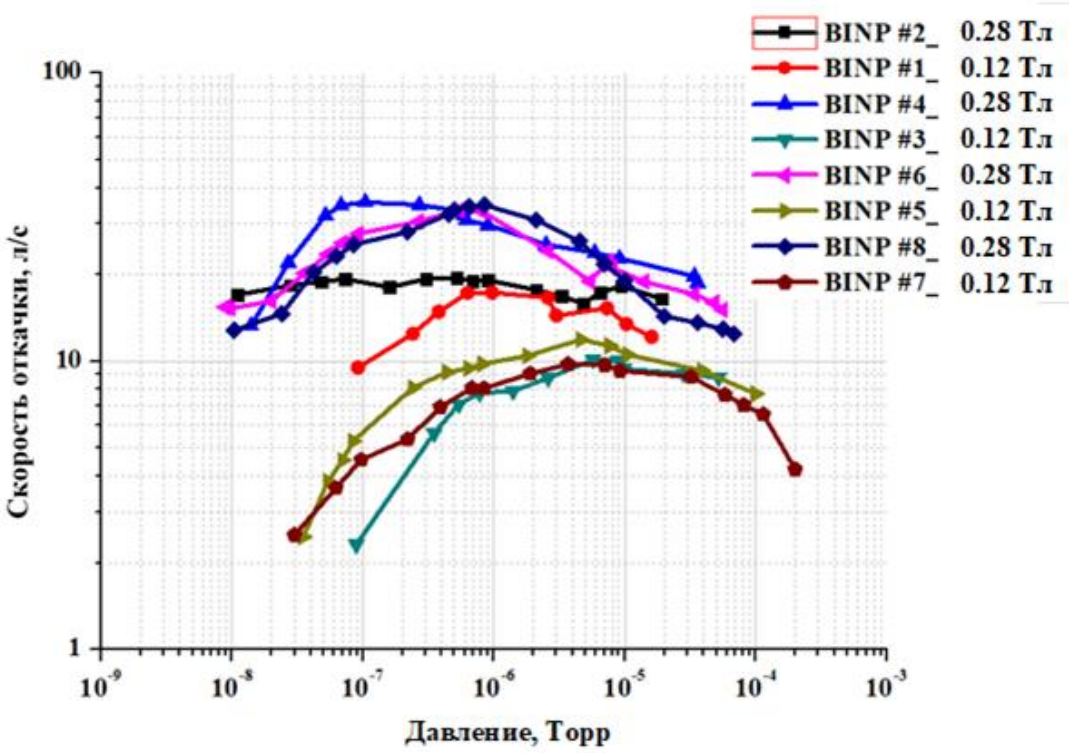

BINP #2_ 0.28 Тл
BINP #1_ 0.12 Тл
BINP #4_ 0.28 Тл
BINP #3_ 0.12 Тл
BINP #6_ 0.28 Тл
BINP #5_ 0.12 Тл
BINP #8_ 0.28 Тл
BINP #7_ 0.12 Тл
Скорость откачки, л/с
100
10
1
10^{-9}
10^{-8}
10^{-7}
10^{-6}
10^{-5}
10^{-4}
10^{-3}
Давление, Торр

Рис. 6.

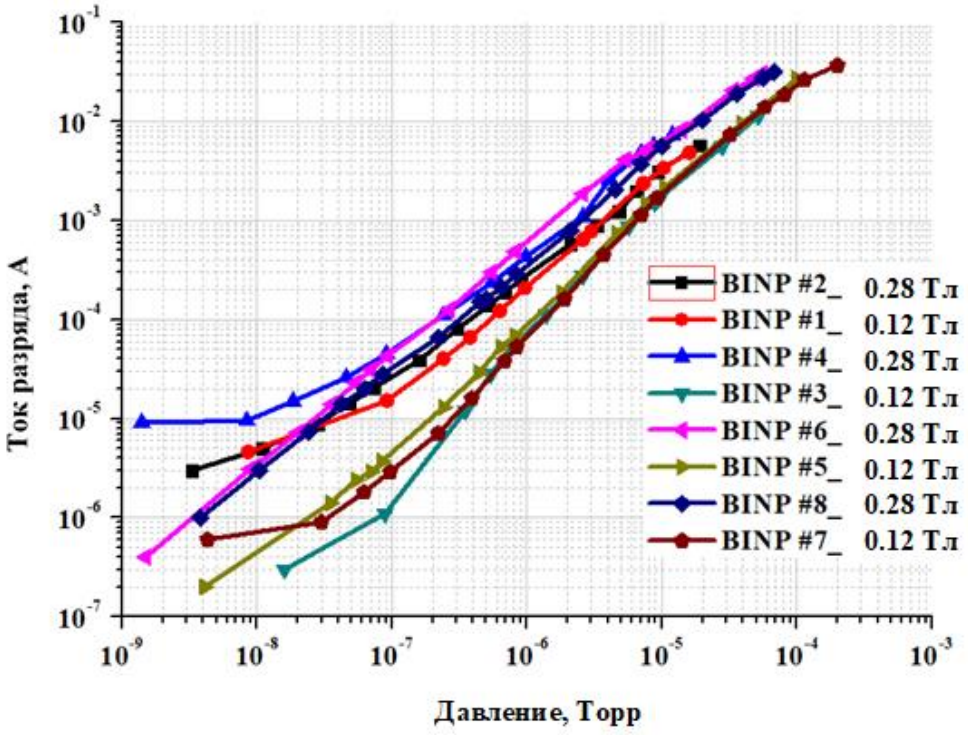

Ток разряда, А
Давление, Торр
BINP #2_ 0.28 Тл
BINP #1_ 0.12 Тл
BINP #4_ 0.28 Тл
BINP #3_ 0.12 Тл
BINP #6_ 0.28 Тл
BINP #5_ 0.12 Тл
BINP #8_ 0.28 Тл
BINP #7_ 0.12 Тл

Рис. 7