

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ВЫСОКОВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ ДЛЯ ЦКП «СКИФ»

А.А. Краснов, А.М. Семенов

АННОТАЦИЯ

В настоящее время в вакуумных системах ускорителей заряженных частиц получение вакуума нельзя представить себе без применения магниторазрядных насосов и сосредоточенных вакуумных насосов на базе нераспыляемых геттеров (non-evaporable getters, NEG). Данные насосы будут применяться в синхротроне 4+ поколения ЦКП «СКИФ». В ИЯФ СО РАН были изготовлены и протестированы прототипы компактных магниторазрядных насосов триодного типа с быстротой откачки 20 л/с и 40 л/с и геттерных насосов с быстротой откачки по водороду 300 л/с, 600 л/с, 900 л/с и 1300 л/с. Конструкция насосов, а также результаты испытаний представлены в данной статье.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

СВЕРХВЫСОКИЙ ВАКУУМ, НЕРАСПЫЛЯЕМЫЙ ГЕТТЕР, НАКОПИТЕЛЬ, ИСТОЧНИК СИ

THE DOMESTIC HIGH VACUUM PUMPS FOR SRF «SKIF»

A.A. Krasnov, A.M. Semenov

ABSTRACT

At present, the compact sputter ion pumps of triode type and lumped vacuum pumps based on the non-evaporable getters (NEG) have got wide application in accelerator vacuum systems. These pumps are one of the types using for vacuum obtaining in the synchrotron source of 4th generation SFR “SKIF”. In BINP, the compact putter ion pump prototypes with pumping speed of 20 l/s and 40 l/s and NEG prototypes with pumping speed of 300 l/s, 600 l/s, 900 l/s and 1300 l/s for hydrogen were created and investigated. The pumps construction and test results are presented here.

KEYWORDS

ULTRA-HIGH VACUUM, NON-EVAPORABLE GETTER, STORAGE RING, SOURCE SR

ВВЕДЕНИЕ

ЦКП «СКИФ» — уникальный по своим характеристикам источник синхротронного излучения «4+» поколения с энергией 3 ГэВ и с рекордным эмиттансом пучка около 75 пм·рад, который создается в рамках национального проекта «Наука и университеты» и программы «Академгородок 2.0» в наукограде Кольцово Новосибирской области. Для получения сверхвысокого вакуума в условиях чрезвычайно тесного расположения элементов в накопительном синхротроне СКИФ, принято решение разработать и применить малогабаритные специализированные магниторазрядные насосы и малогабаритные насосы на базе нераспыляемых геттеров отечественного производства [1]. В данной комбинации, основная задача магниторазрядного насоса – откачка инертных газов, выделяющихся из сварных швов и проникающих через микротечи, практически неизбежные в больших вакуумных установках. Задача же геттерных насосов - обеспечить большую скорость откачки по химически активным газам, основным источником которых, является стимулированная

десорбция под воздействием интенсивного синхротронного излучения на стенки вакуумной камеры.

Мировая практика производства магниторазрядных насосов показала, что наибольшей эффективностью откачки по инертным газам обладают триодные насосы со специфической геометрией катода, благодаря которой повышается коэффициент распыления катодного материала на поверхности неподверженные бомбардировке ионов и электронов. Первые в России малогабаритные однопотенциальные неохлаждаемые магниторазрядные насосы подобного типа разработаны и произведены в АО «Катод» (Новосибирск) и ООО «Призма» (Новосибирск) при тесном сотрудничестве с ИЯФ СО РАН. В настоящей статье представлены краткое описание и результаты тестирования этих насосов.

Также в мире многие производители магниторазрядных насосов предпринимали и предпринимают попытки создать магниторазрядные насосы с сильным магнитным полем. Важным преимуществом данных насосов заключается в том, что можно либо уменьшить массогабаритные размеры насоса при сохранении скорости откачки насоса, либо увеличить скорость откачки за счет размещения большего количества анодных ячеек, т.к. чем больше величина магнитного поля, тем в меньшем размере анодной ячейки возможно «возникновение» разряда. Начиная с 2020 г. в ИЯФ СО РАН были возобновлены работы по созданию магниторазрядных насосов с сильным (до 0,3 Тл) магнитным полем [2]. К сожалению, пока не удалось устранить недостаток, связанный с предельным вакуумом самого насоса (минимальное давление равняется 10^{-9} Торр).

Материалы в геттерных насосах связывают газ за счет хемосорбции. Таким образом, они должны быть химически активны по отношению к остаточным газам, доминирующим в высоковакуумных системах, таким как H_2 , CO, CO_2 и т. д. Геттеры, по способу применения, подразделяются на два типа: нераспыляемые геттеры (НГ) и распыляемые геттеры. Нераспыляемые геттеры используются в основном в тех случаях, когда нежелательно распыление металлов в вакууме или недостаточно свободной поверхности в установке для достижения требуемой сорбционной емкости. НГ помещаются в вакуумную систему или наносятся на ее элементы до вакуумирования и, по определению, изготавливаются из химически активных металлов, таких как титан, цирконий, ванадий, алюминий или из их сплавов, а также порошковых смесей. Сосредоточенные геттерные насосы обычно представляют из себя картриджи, состоящие из прессованных спеченных порошков в виде дисков или пластин [3]. В нормальных условиях поверхность геттера, как и любого другого металла, покрыта тонким слоем естественного окисла с примесями карбидов (содержание зависит от способа производства) и гидро-оксидов (физадсорбция воды). Естественный окисел надежно защищает металл от дальнейшего окисления на воздухе и делает некоторые металлы, например, титан, химически стойкими по отношению ко многим химически-активным средам, что, наряду с механическими свойствами, обуславливает их широкое применение в промышленности. После размещения геттерного материала в вакууме и откачки молекул воздуха, пассивирующий слой необходимо удалить, чтобы очистить геттерную поверхность для дальнейшего процесса хемосорбции. Это достигается термической обработкой, называемой «активацией», при которой происходит диффузия химически связанных атомов кислорода, углерода и азота с поверхности в объем газопоглотителя.

Ключевой особенностью НГ является их большая скорость откачки на единицу объема. Дополнительными особенностями являются малый вес, отсутствие вибрации (отсутствие движущихся частей), малое энергопотребление, и незначительное влияние на

магнитное поле (магнитная проницаемость наиболее часто используемых геттеров $<1,001$). Кроме того, геттерные насосы практически не нуждаются в техническом обслуживании.

Основными недостатками геттеров являются их малая сорбционная емкость по всем сорбируемым газам за исключением водорода, который диффундирует в объем геттера при комнатной температуре, и избирательность при сорбции газов, т.е. химически пассивных газов, не вступающих в реакцию с геттерным материалом, таких как инертные газы и насыщенные (предельные) углеводороды (метан, этан и т.д.) [4].

Первые в России образцы геттерных насосов, состоящих из отечественных спеченных геттерных дисков, уложенных в картридж с внутренним нагревателем, были созданы и успешно испытаны в ИЯФ СО РАН. Описание конструкции и результаты тестирования представлены в данной статье.

ОПИСАНИЕ РАБОТЫ ТРИОДНОГО НАСОСА

Схема устройства магниторазрядного насоса триодного типа показана на рис. 1.

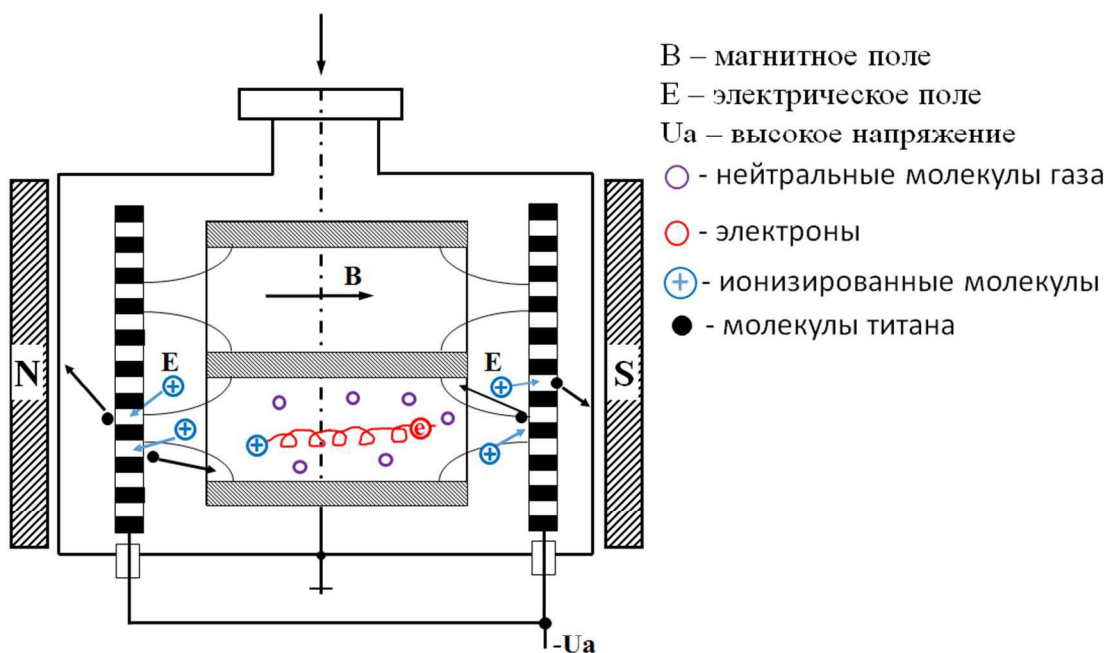


Рис. 1. Схема устройства магниторазрядного насоса триодного типа

Насос состоит из анода, катода в виде сеточной или звездочной структуры с меньшим, чем у анода, размером ячеек и третий электрод, которым, обычно, является корпус самого насоса. Анод и сам насос находятся под нулевым потенциалом. На катод подается отрицательное напряжение от -3 до -7 кВ. Катод изготавливается из титана, а насос и анод из нержавеющей стали.

Механизм откачки газов в магниторазрядных насосах основан на двух основных явлениях:

- химическое связывание газов распыленным титаном;
- абсорбция газов в результате прямого молекулярного контакта с поверхностью электродов.

В зависимости от рода газа преобладает тот или другой механизм. Химическим способом откачиваются активные газы, такие как азот, кислород и т. п. Положительные ионы

этих газов, попадая на катоды, вырывают атомы титана. Атомы титана не заряжены и потому нечувствительны к электрическому и магнитному полям. В основном они осаждаются на поверхности анода, так как именно анод составляет большую часть поверхности, видимой с катода. Ионы и активные радикалы (результат диссоциации молекул в разряде) гораздо легче вступают в химические реакции, чем стабильные молекулы, из которых состоит газ в отсутствие разряда. В результате образуются твердые устойчивые соединения с низким давлением паров.

Легкие газы, такие как водород, гелий не дают заметного распыления титана. Для них более существенным является второй механизм откачки, из-за малых молекулярных размеров, ионы легких газов могут внедряться в тело катода и диффундировать вглубь. Заметная откачка водорода продолжается в течение некоторого времени после выключения разряда, т. е. нейтральные атомы водорода адсорбируются чистой поверхностью катода.

Титан и водород хорошо взаимодействуют друг с другом, образуя гидрид титана. Считается, что один атом титана способен связать до двух атомов водорода, т.е. теоретическая формула равняется TiH_2 , но наибольшее измеренное экспериментально содержание водорода в пленке титана соответствует составу $TiH_{1,76}$. В обычных условиях быстрота откачки для водорода в $2,5 \div 3$ раза больше, чем для воздуха.

Были протестированы триодные насосы двух производителей АО «Катод» (Новосибирск) и ООО «Призма» (Новосибирск). АО «Катод» изготовил магниторазрядные насосы (40 л/с и 20 л/с по азоту) триодного типа с ячейкой так называемой «StarCell» (НМТ-К-0,04 и НМТ-К-0,02). Диаметр анодной ячейки 20 мм. Длина ячейки - 25 мм. Зазор между анодом и катодом составляет 5 мм, а количество таких ячеек - 33 шт для НМТ-К-0,04 и 23 шт для НМТ-К-0,02. Полный размер анодного блока: ширина - 120 мм для НМТ-К-0,04 или 80 мм для НМТ-К-0,02, длина в обоих случаях - 80 мм. Величина магнитной индукции - 0,12 Тл. Каждый катод представляет из себя сваренные между собой титановые пластины толщиной 1,5 мм с выдавленными двенадцатью «ребрами» под углом 30° относительно друг друга (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид электродного блока с катодами в виде «StarCell»

Триодный насос производства ООО «Призма» (НМТР-20) имеет диаметр и длину анодной ячейки аналогичные как у триодного насоса фирмы АО «Катод». Но зазор между анодом и катодом составляет 4 мм, а количество ячеек - 23 шт. Полный размер анодного блока: ширина - 90 мм, длина - 100 мм. Величина магнитной индукции - 0,12 Тл. Каждый катод представляет из себя сваренные между собой титановые пластины толщиной 1,0 мм в виде «жалюзи» под углом 10° к торцу катода.

Более наглядно основные параметры всех магниторазрядных насосов представлены в Таблице 1.

Таблица 1.
Основные параметры магниторазрядных насосов.

Название насоса	Диаметр ячейки (d), мм	Длина ячейки (h), мм	Зазор между анодом и катодом (b), мм	Габариты анодного блока (a/l), мм	Кол-во ячеек	Магнитное поле (B), Тл	Напряжение (Ua), кВ	Тип насоса
НМТ-К-0,04	20	25	5	185/80	33	0,12	4,0	StarCell
НМТ-К-0,02	20	25	5	129/80	23	0,12	4,0	StarCell
НМТР-20	20	25	4	90/110	23	0,12	4,0	Триод

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МАГНИТОРАЗРЯДНЫХ НАСОСОВ

Экспериментальные данные были получены в соответствии с методикой, изложенной в Международном стандарте ISO DIS 3556.

Магниторазрядный насос является насыщенным, когда поглощается порядка 0,6 л·Торр газа для насоса с быстротой действия 20 л/с или 1,2 л·Торр газа для насоса с быстротой действия 40 л/с.

Экспериментальные результаты для всех трех триодных насосов приведены на рис 3-9.

ОПИСАНИЕ ПРОТОТИПОВ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ НА БАЗЕ NEG

Фирма АО «Полема» производит нераспыляемые газопоглотители в промышленных масштабах для атомной энергетики и нефтегазовой отрасли [5]. Первые вакуумные насосы на базе геттеров Ti-Zr-Al производства фирмы АО «Полема» были изготовлены из таблеток следующих размеров: диаметром 13±0,5 мм, толщиной 3±0,5 мм и пористостью 60%. Более подробно с результатами можно ознакомиться в [6, 7].

Основные параметры насосов представлены в Таблице 2. Насосы изготовлены из дисков, спеченных из прессованного порошка состава Ti-Zr-Al. Внешний диаметр каждого диска 25 мм, толщина 1,6 мм, пористость 30%, внутренний диаметр 8 мм для размещения нагревателя. Диски установлены последовательно в ряд с зазором 1,5 мм в количестве 30 шт в каждой «колонне». Высота (от фланца до торца геттерного насоса) не превышает 130

мм. Температура контролируется термопарой типа «К». Для снижения мощности нагревателя и предотвращения перегрева корпуса насоса используется один защитный экран снаружи картриджа. Геттерные насосы располагаются на фланцевых соединениях типа Conflat.

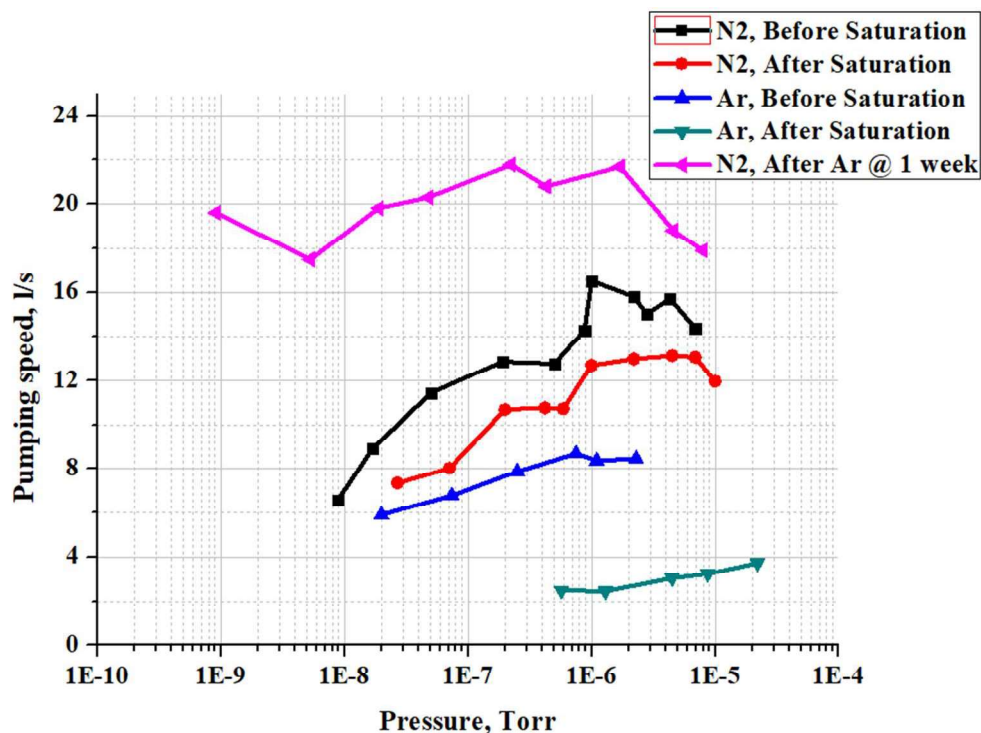


Рис.3. Зависимость быстроты откачки магнитоэридного насоса НМТР-20 от давления

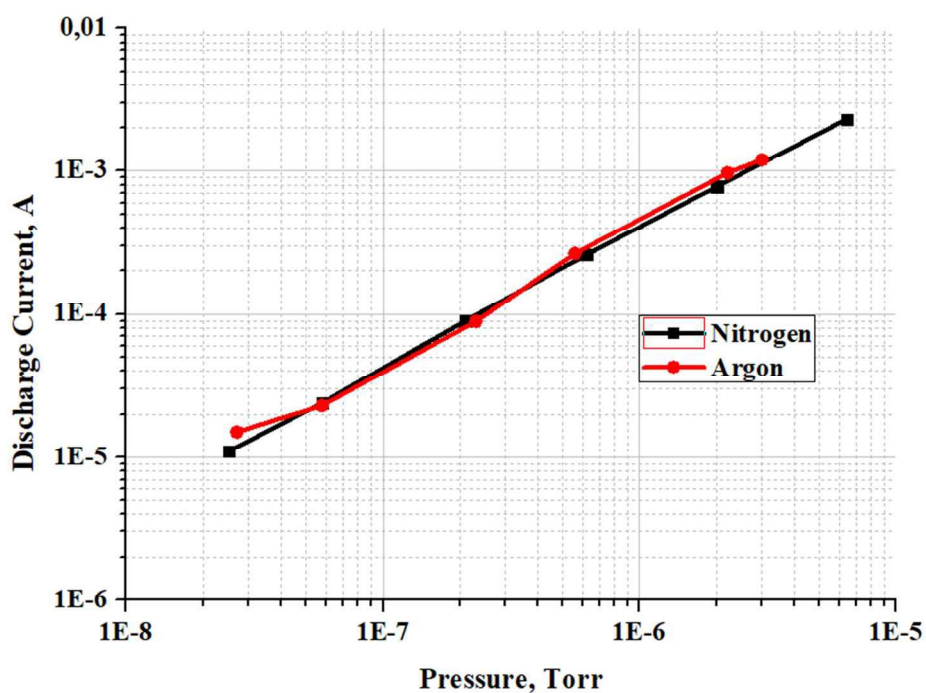


Рис. 4. Зависимость тока разряда магнитоэридного насоса НМТР-20 от давления

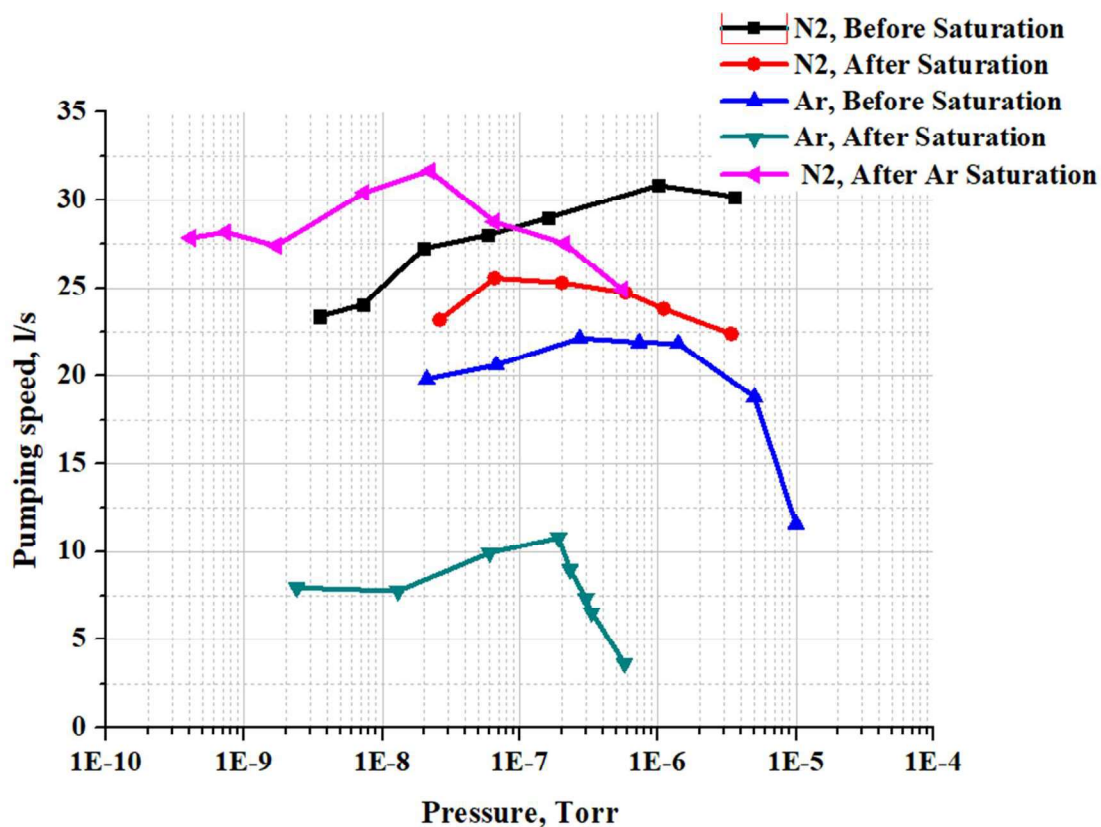


Рис. 5. Зависимость быстроты откачки магниторазрядного насоса НМТ-К-0,04-СF35 от давления

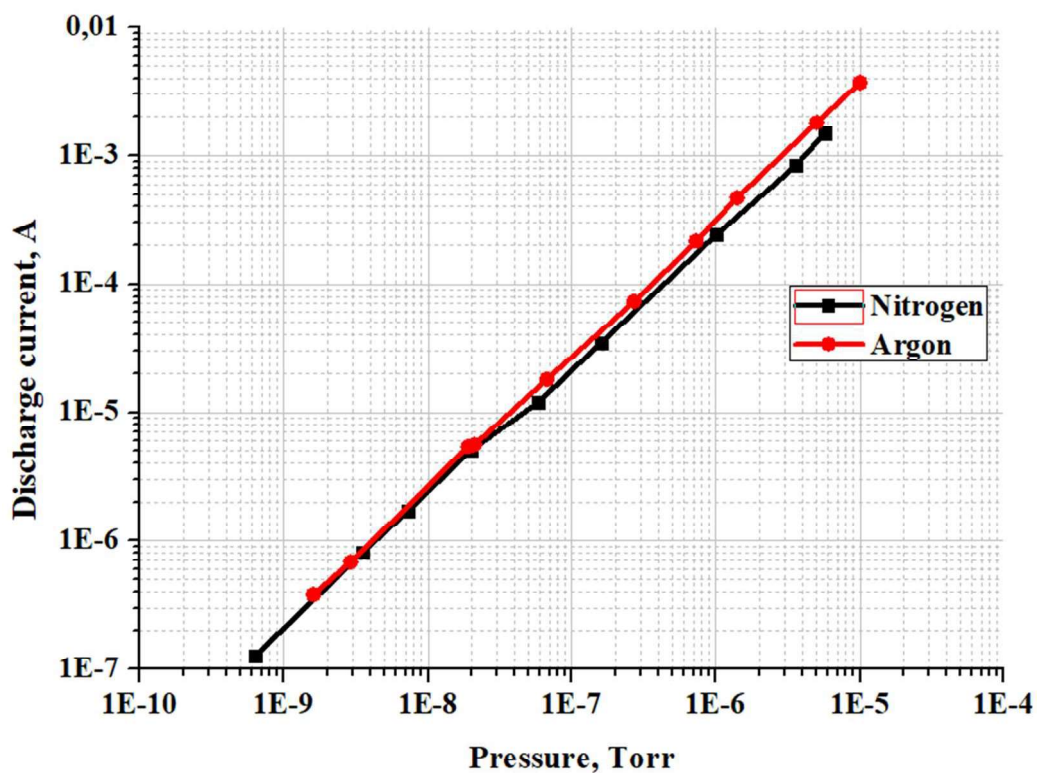


Рис. 6. Зависимость тока разряда магниторазрядного насоса НМТ-К-0,04-СF35 от давления.

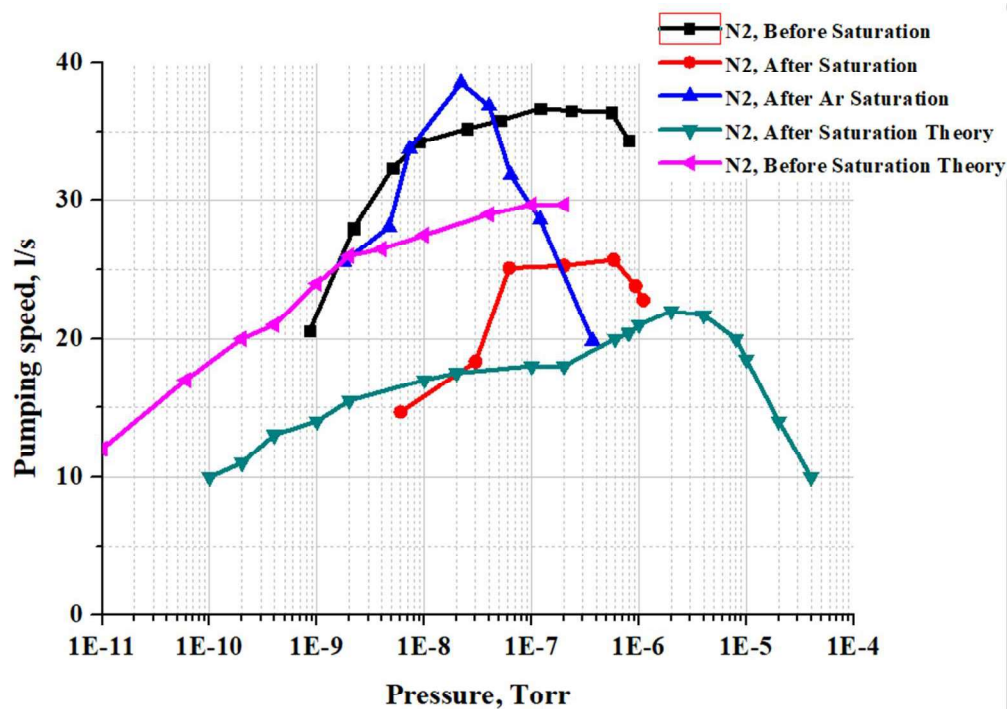


Рис. 7. Зависимость быстроты откачки от давления азота для магнетронного насоса НМТ-К-0,02-СF35

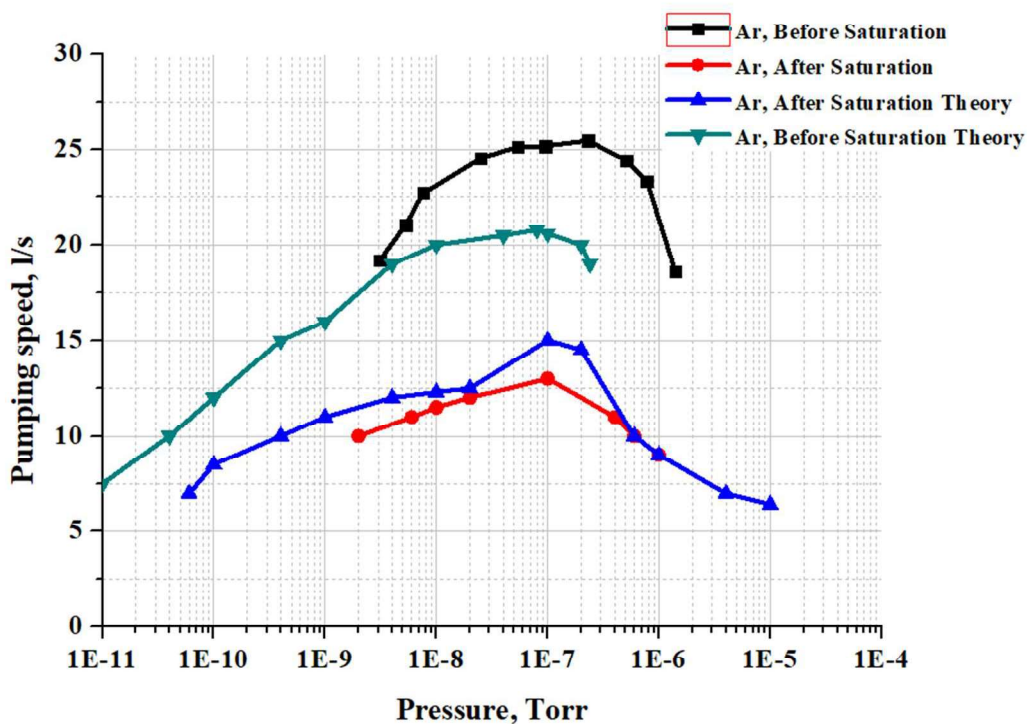


Рис. 8. Зависимость быстроты откачки от давления аргона магнетронного насоса НМТ-К-0,02-СF35

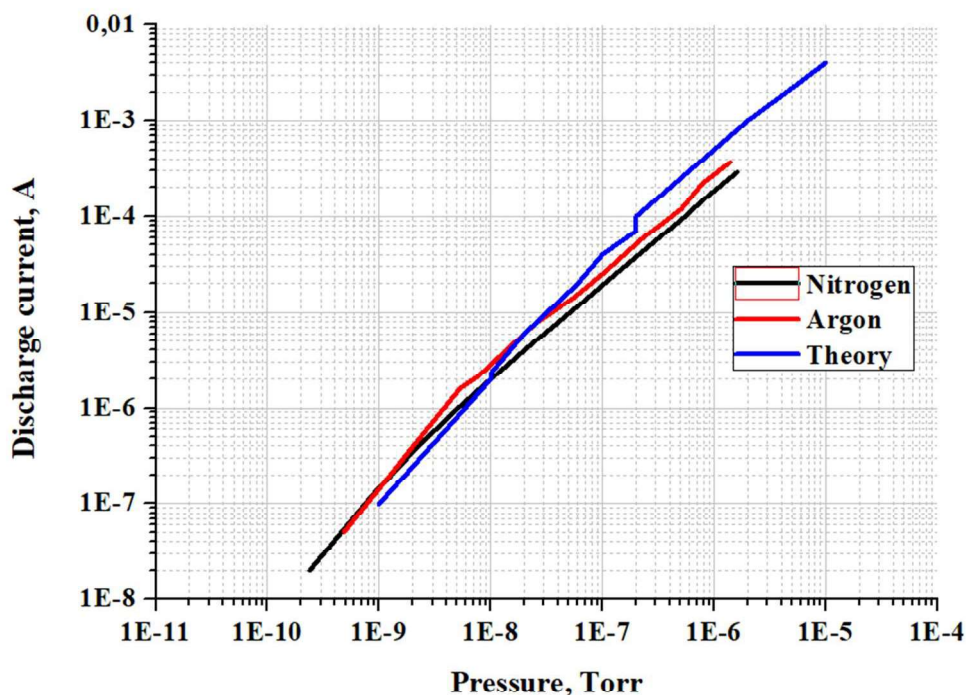


Рис. 9. Зависимость тока разряда магниторазрядного насоса НМТ-К-0,02-CF35 от давления

Таблица 2

Основные параметры геттерных насосов

Прототип	Мак температура активации, °С	Кол-во «колонн», шт	NEG поверхность, см ²	Вес геттера, г	Пористость, %	Тип фланца
NEG300	650	1	300	60	30	Ду 40
NEG600		2	600	120		Ду 63
NEG1000		4	1200	240		Ду 100
NEG1200		6	1600	360		Ду 100

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ГЕТТЕРНЫХ НАСОСОВ

До начала измерений весь стенд прогревался при температуре 230 °С в течение 24 часов для уменьшения фонового вакуума. После охлаждения до комнатной температуры, геттер активировался при максимальной температуре (650 °С) в течение 20 часов, затем пассивировался в атмосфере воздуха в течение не менее трех часов.

Измерения скорости откачки по водороду и моно-оксиду углерода, а также сорбционной емкости по моно-оксиду углерода выполнялись при комнатной температуре после активаций геттеров при температуре от 350 до 650 °С через каждые 50 °С. Сорбционная емкость по моно-оксиду углерода принималась равной количеству газа, при поглощении которого скорость откачки уменьшалась до 10% от первоначального значения после активации. Сорбционная емкость по водороду не измерялась. По оценкам сорбционная емкость по водороду в тысячи раз превышает сорбционную емкость по моно-оксиду углерода.

Зависимость скорости откачки от поглощенной дозы по водороду и моно-оксиду углерода для каждого геттерного насоса представлены на рис.10.

Скорость откачки по водороду и моно-оксиду углерода при различных температурах активации для четырех геттерных насосов показаны на рис. 11.

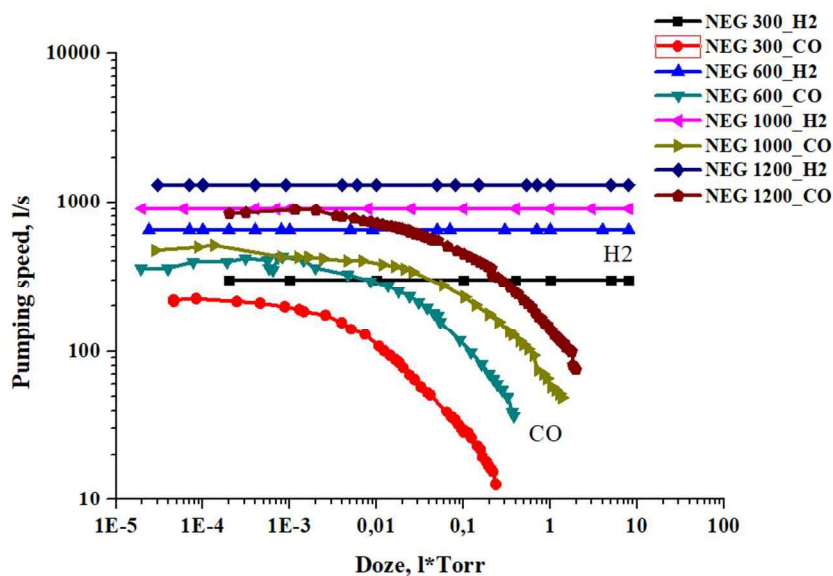


Рис. 10. Зависимость быстроты откачки от поглощенной дозы по водороду и моно-оксиду углерода.

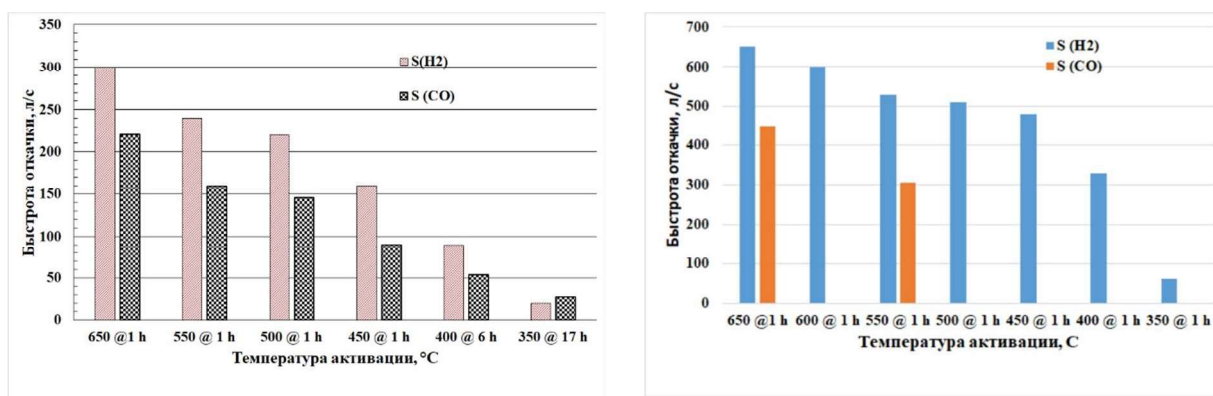


Рис. 11. Скорость откачки геттерных насосов по водороду и CO при различных температурах активации

Также в таблице 3 представлены результаты тестирования геттерных насосов производства ИЯФ СО РАН и, для сравнения, параметры геттерных насосов фирмы SAES Getters [8].

Таблица 3.

Экспериментальные результаты для геттерных насосов
производства ИЯФ СО РАН и параметры насосов фирмы SAES Getters

	NEG насос	Мак скорость откачки по H ₂ , л/с	Мак скорость откачки по CO, л/с	Сорбционная емкость по CO, л·Торр	Мощность активации @ 650 °С, Вт	Мощность активации @ 550 °С, Вт	Отношение скорости откачки по H ₂ к площади геттера
ИЯФ СО РАН	300	300	220	0,24	124	78	1,0
	600	650	450	0,38	273	160	1,08
	1000	900	500	1,4	270	180	0,83
	1300	1300	850	2,0	370	255	0,81
SAES Getters	Capaci Torr 200	200	125	0,6	-	58	0,84
	Capaci Torr 1000	1000	600	4	-	190	0,88

ВЫВОДЫ

1. Триодные насосы фирмы АО «Катод» соответствуют мировым стандартам и насосы с быстрой откачки 40 л/с будут применены в инжекционной части ЦКП «СКИФ».
2. Прототипы вакуумных насосов на базе нераспыляемых геттеров с быстрой откачки 300 л/с, 600 л/с, 900 л/с и 1300 л/с по водороду были изготовлены и протестированы.
3. Данные насосы соответствуют зарубежным аналогам по своим характеристикам, таким как температуре активации, скорости откачки и сорбционной емкости.
4. Газопоглотители фирмы АО «Полема» могут быть применены не только в ускорительной технике, но и в любых других сверхвысоковакуумных установках, где требуется поддержание глубокой степени разрежения без вскрытия на атмосферу в течение длительного времени.
5. Следующий, естественный шаг в унификации сверхвысоковакуумных отечественных насосов – разработка комбинированного компактного магниторазрядного и геттерного насоса в едином корпусе.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Krasnov, Conception of vacuum system for SRS «SKIF», Synchrotron and Free electron laser Radiation: generation and application, 13 July - 17 July 2020, Novosibirsk, Russia.

2. A. Semenov, V. Anashin, and A. Krasnov. Development of sputter ion pump with strong magnetic field for obtaining of ultrahigh vacuum. AIP Conference Proceedings 2299, 020010 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0030428>.
3. G.L. Saksaganskii, *Getter and Getter-Ion Vacuum Pumps* (Harwood Academic Publishers, Chur, 1994), p. 258.
4. Смирницкая Г.В., Рейхрудель Э.М., Характеристики разряда с осциллирующими электронами и его применение в магниторазрядных насосах (обзор), *Электроника и его применение*, Т. 8, стр. 43-65, 1976.
5. Официальный сайт АО «Полема», <http://www.polema.net/oblasti-primenenija.html>
6. Драничников А.Н., Краснов А.А., Семенов А.М. // *Прикладная физика*. 2017. № 2. С. 73.
7. В.В. Анашин, А.А. Краснов, А.М. Семенов // *ПТЭ*, 2020, № 6, с. 109–114; V.V. Anashin, A.A. Krasnov, A.M. Semenov // *Instruments and Experimental Techniques*, 2020, Vol. 63, No. 6, pp. 893–897.
8. Официальный сайт фирмы SAES Getters <https://www.saesgetters.com/sites/default/files/CapaciTorr%20UHV%20general%20%2B%20D%20%20pumps.pdf>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

А.А. Краснов – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск; Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск. e-mail: a.a.krasnov@inp.nsk.su

А.М. Семенов – кандидат технических наук, доцент; старший научный сотрудник ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск; Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск. e-mail: a.m.semenov@inp.nsk.su