

СОВРЕМЕННЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ ДЛЯ ЦКП СКИФ¹

© 2025 г. А. М. Семенов^{a, b, *}, А. А. Краснов^{a, c}

^a Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^b Новосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

^c Новосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

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

Поступила в редакцию 23.11.2023 г.

После доработки 24.04.2024 г.

Принята к публикации 25.04.2023 г.

В вакуумных системах ускорителей заряженных частиц все чаще применяют комбинированные малогабаритные сверхвысоковакуумные насосы на базе нераспыляемых геттеров и магнито-разрядных насосов в одном корпусе. Данный тип насосов будет применяться в синхротроне 4+ поколения ЦКП СКИФ. В ИЯФ СО РАН был изготовлен и протестирован прототип комбинированного насоса с быстротой откачки водорода 1000 л/с. Представлены конструкция насоса, а также результаты измерений для различных газов.

DOI: 10.7868/S3034564225070263

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Новосибирске идет строительство источника синхротронного излучения (СИ) 4+ поколения ЦКП СКИФ [1] с рекордно малым эмиттансом пучка (75 пм · рад при энергии 3 ГэВ). Одним из условий получения рекордных параметров и проектного времени жизни (более 10 ч) пучка является сверхвысокий динамический вакуум на уровне 10^{-9} торр в накопительном кольце СКИФ. Достижение столь низкого давления остаточных газов в условиях интенсивного синхротронного излучения требует применения мощной системы откачки [2].

Широкое распространение в вакуумных системах ускорителей получили ионно-геттерные магнито-разрядные насосы. Но, к сожалению, увеличение скорости откачки данных насосов сопряжено с увеличением как габаритов, так и массы. Данное обстоятельство не

позволяет достичь требуемых параметров откачивающей системы на основе магнито-разрядных насосов из-за пространственных ограничений на размещение вакуумных элементов в накопителе СКИФ. Существенно меньшими масса-габаритными параметрами обладают геттерные насосы, в которых спеченный геттерный материал в виде пластинок или дисков уложен в картридж, снабженный нагревателем для термической активации геттера. Данные насосы связывают газ за счет хемосорбции, поэтому они не откачивают инертные газы [3], а также насыщенные углеводороды, составляющие в сумме несколько процентов от общего количества молекул газа, десорбирующихся с внутренней поверхности вакуумных систем. Если к геттерному насосу, обладающему большой скоростью откачки, добавить небольшой насос, способный откачивать химически пассивные газы, например магнито-разрядный, то получится универ-

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, г. Новосибирск.

сальный комбинированный насос, обладающий малыми габаритами и способный откачивать весь спектр остаточных газов.

Впервые данный тип насоса был разработан и изготовлен фирмой SAES Getters (Италия) [4]. В ИЯФ СО РАН был изготовлен и протестирован прототип комбинированного насоса с быстротой откачки 1000 л/с по водороду и 23 л/с по аргону.

В данной статье представлены результаты измерения скорости откачки комбинированного насоса от количества поглощенного газа для водорода, азота, метана и монооксида углерода, а также измерен предельный вакуум от количества поглощенного аргона.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ

Активационные и газопоглощающие характеристики прототипа комбинированного насоса измерялись на специализированной экспериментальной установке (рис. 1). Предварительная откачка системы проводилась турбомолекулярной станцией, включающей в себя турбомолекулярный насос (TMP_1) и безмасляный мембранный насос (MP). Высоковакуумная откачка осуществлялась турбомолекулярным насосом

TMP_2 . От напуска воздуха до атмосферного давления со стороны TMP_1 и MP был установлен аварийный электрический клапан VR_3 . Измерение форвакуума и высокого вакуума осуществлялось широкодиапазонным датчиком давления марки PKR 251 фирмы Pfeiffer, состоящим из датчика Pirani и датчика давления с холодным катодом, и расположенным на откачной станции.

Напуск газа в систему выполнялся через игольчатый натекаль VF и капилляр C (молекулярная проводимость по водороду равна $2.8 \cdot 10^{-3}$ л/с). Откачка системы инъекции проводилась турбомолекулярной станцией через вакуумные клапаны VR_4 и VR_5 . Для контроля давления напускаемого газа использовались стрелочный манометр и емкостной датчик давления "Baratron".

Измерение давления в системе выполнялось датчиком давления с горячим катодом IG_1 . Измерение парциальных давлений газов проводились при помощи квадрупольного масс-спектрометра RGA фирмы SRS (Стэнфорд, США). Датчик давления с горячим катодом IG_2 необходим для контроля давления во время предварительного прогрева и активации геттера.

До проведения экспериментов весь стенд прогревался при температуре 220–240 °С, чтобы уменьшить десорбцию со стенок камеры. Также

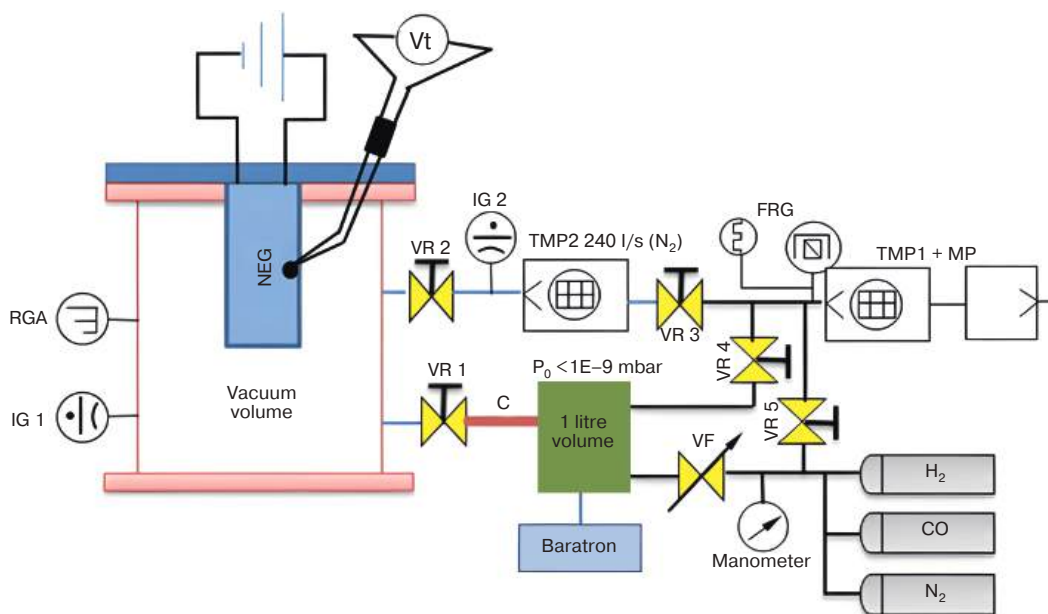


Рис. 1. Стенд для измерения коэффициента термического газовыделения: VR_1 —цельнометаллические угловые клапаны; IG — ионизационный датчик давления с горячим катодом типа Bayard-Albert; FRG — широкодиапазонный датчик давления от 10^{-10} мбар до 1000 мбар; TMP — турбомолекулярный насос; MP — безмасляный форвакуумный (мембранный) насос.

до проведения экспериментов были измерены эффективная быстрота откачки турбомолекулярного насоса TMP_2 , молекулярная проводимость капилляра и коэффициенты чувствительности датчиков давления с горячим катодом по каждому газу (H_2 , CO , Ar). В табл. 1 приведена информация по этим величинам для данных газов. После каждого напуска воздуха до атмосферного давления проводилась калибровка всех измерителей вакуума. В начале экспериментов клапан VR_1 был закрыт. Затем клапан открывался, и инжектируемый газ начинал поступать в тест-камеру через капилляр. Газовый поток в тест-камеру определяется выражением

$$Q_{total} = C(P_{in} - P_{out}), \quad (1)$$

где C [л/с] – канал с калиброванной проводимостью, P_{in} , P_{out} [торр] – давление на входе и выходе капилляра C .

Быстрота откачки геттера S_{NEG} может быть определена в течение напуска газа как:

$$S_{NEG} = \frac{C \cdot (P_{in} - P_{out})}{K \cdot (P_{IG1 \text{ after}} - P_{IG1 \text{ before}})}, \quad (2)$$

где S_{NEG} [л/с] – скорость откачки NEG насоса; C [л/с] – молекулярная проводимость капиллярного канала; $P_{IG1 \text{ after}}$ [торр] – давление после напуска газа датчика давления IG_1 ; $P_{IG1 \text{ before}}$ [торр] – давление до напуска газа датчика давления IG_1 ; K – коэффициент чувствительности.

Сорбционная емкость определялась как количество молекул, при поглощении которых быстрота откачки комбинированного насоса не достигает постоянного значения при данном потоке, равном быстроте откачки самого магнеторазрядного насоса:

$$Doze = \int_0^t Q_{total} dt, \quad (3)$$

где Q_{total} [л · торр/с] – полный поток газа; t [с] – время измерения.

Таблица 1. Молекулярная проводимость капиллярного канала, эффективная быстрота откачки и коэффициент чувствительности датчиков давления с горячим катодом для разных газов

Газ	Молекулярная проводимость C , л/с	Эффективная быстрота откачки $S_{эфф}$, л/с	Коэффициент чувствительности K_{IG1}	Коэффициент чувствительности K_{IG2}
H_2	$2.8 \cdot 10^{-3}$	28	2.3	2.3
CO	$7.6 \cdot 10^{-4}$	8.4	1	1
Ar	$6.36 \cdot 10^{-4}$	7	0.77	0.74

3. ОПИСАНИЕ ПРОТОТИПА КОМБИНИРОВАННОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

В комбинированном насосе применяется магнеторазрядный насос триодного типа с ячейкой, так называемой StarCell производства АО “Катод”, быстрота действия которого 40 л/с по азоту. Диаметр анодной ячейки 20 мм. Длина ячейки – 25 мм. Зазор между анодом и катодом составляет 5 мм, а количество таких ячеек равнялось 33. Полный размер анодного блока: ширина – 120 мм, длина – 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). Присоединительный фланец Ду 40 типа Conflat.

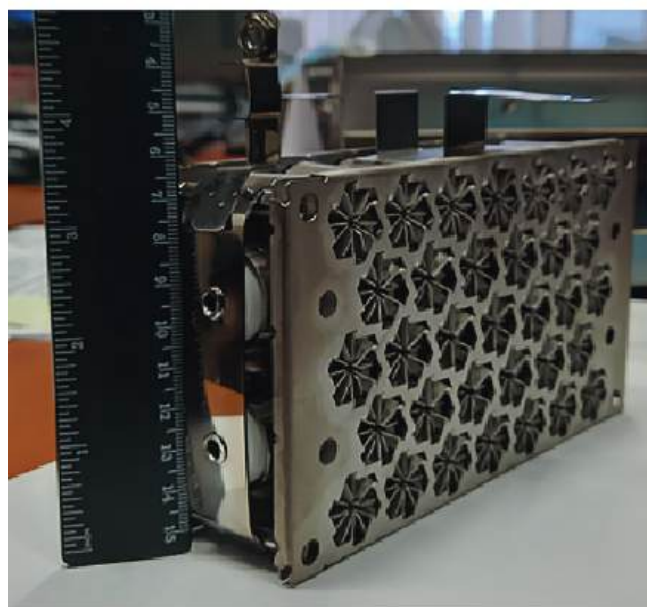


Рис. 2. Электродный блок с катодами в виде “StarCell”.

Как уже не раз сообщалось, фирма АО “Полема” производит нераспыляемые газопоглотители в больших количествах для атомной энергетики и нефтегазовой промышленности [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].

Насос изготовлен из геттерных дисков. Внешний диаметр каждого диска 25 мм, толщина 1.6 мм, пористость 30%, внутренний диаметр 8 мм для размещения нагревателя. Химический состав нераспыляемого газопоглотителя Ti-Zr-Al. 30 дисков последовательно установлено в ряд с зазором 1.5 мм в каждой “колонне”. Суммарная площадь составляет 1600 см^2 , а вес геттера – 360 г. Количество “колонн” равняется шести. Высота (от фланца до торца геттерного насоса) не превышает 130 мм. Температура контролируется термопарой типа “К”. Для снижения мощности нагревателя в два раза используется один защитный экран снаружи. Геттерный насос располагается на фланцевом соединении типа Conflat Ду 100. 3D-изображение комбинированного насоса представлено на рис. 3. Изучение газопоглощающих и активационных параметров геттерной составляющей комбинированного насоса было успешно выполнено ранее и представлено в работах [8, 9].

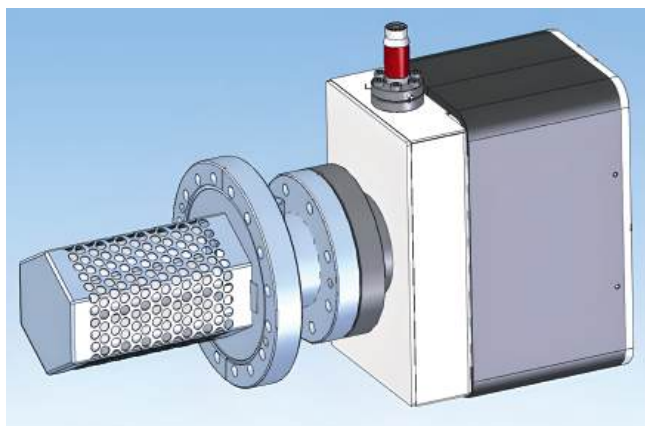


Рис. 3. 3D-изображение комбинированного насоса.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

До начала измерений весь стенд прогревался при температуре 230°C в течение 24 ч для уменьшения фонового давления. После охлаждения до комнатной температуры геттер активировался при максимальной температуре (650°C) в течение 1 ч.

Измерения скорости откачки по различным газам выполнялись после активации геттера при температуре 650°C и при охлаждения геттерного насоса до комнатной температуры. Измерения сорбционной емкости для каждого газа представлены на рис. 4. Результаты хорошо согласуются с ранее проведенными исследованиями свойств геттерных насосов [8].

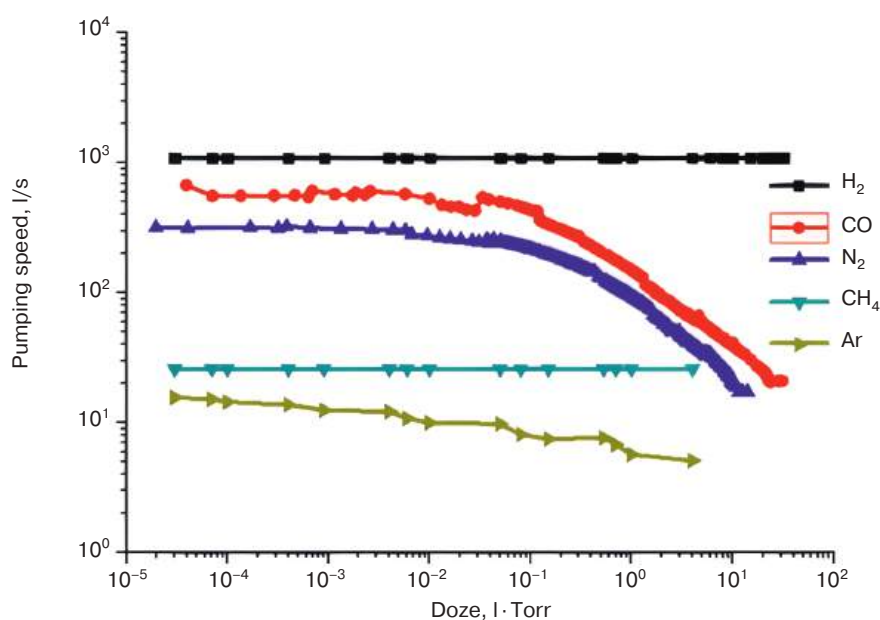


Рис. 4. Сорбционная емкость комбинированного насоса для различных газов.

Появление микротечей, которые сложно или невозможно устранить без напуска воздуха до атмосферного давления, представляет собой довольно распространенное явление в сложных электровакуумных установках. Поэтому способность откачивать хотя и небольшие, на уровне менее 10^{-7} л · торр/с, но непрерывно поступающие потоки молекул воздуха, сохраняя необходимый уровень вакуума, является важной характеристикой откачивающей системы. При этом наибольшую опасность для комбинированного насоса представляет аргон, который откачивается только маломощной магниторазрядной частью. Очевидно, накопление аргона в магниторазрядных ячейках должно привести к увеличению предельного давления по аргону, что может повлиять на “вакуумное” время жизни пучка уже при давлении аргона порядка 10^{-10} торр, поскольку сечение рассеяния реля-

тивистских электронов пропорционально квадрату заряда ядра. Именно это обстоятельство определило выбор магниторазрядной ячейки триодного типа StarCell, обладающей наибольшей быстротой откачки и сорбционной емкостью по инертным газам.

На рис. 5 показано измеренное равновесное давление аргона в зависимости от поглощенного количества аргона. Можно заметить, что давление аргона находится на приемлемом уровне вплоть до поглощенной дозы порядка 1 л · торр. Такую дозу аргона возможно набрать при непрерывном натекании атмосферного воздуха через течь уровня 10^{-7} л · торр в течение 30 лет.

В табл. 2 представлены результаты измерения параметров комбинированного насоса производства ИЯФ СО РАН и параметры комбинированного насоса NEXTorр D1000-StarCell фирмы SAES Getters [4].

Таблица 2. Экспериментальные результаты для комбинированного насоса производства ИЯФ СО РАН и параметры насоса NEXTorр D1000-StarCell фирмы SAES Getters

Насос	Мах скорость откачки по H_2 , л/с	Мах скорость откачки по CO , л/с	Сорбционная емкость по CO , л · торр*	Мах скорость откачки по CH_4 , л/с	Мах скорость откачки по N_2 , л/с	Сорбционная емкость по N_2 , л · торр*
ИЯФ СО РАН	1000	650	20	26	320	10
NEXTorр D1000-StarCell	1000	580	6	30	320	2.5

* Сорбционная емкость достигается, когда быстрота откачки равняется скорости откачки магниторазрядного насоса.

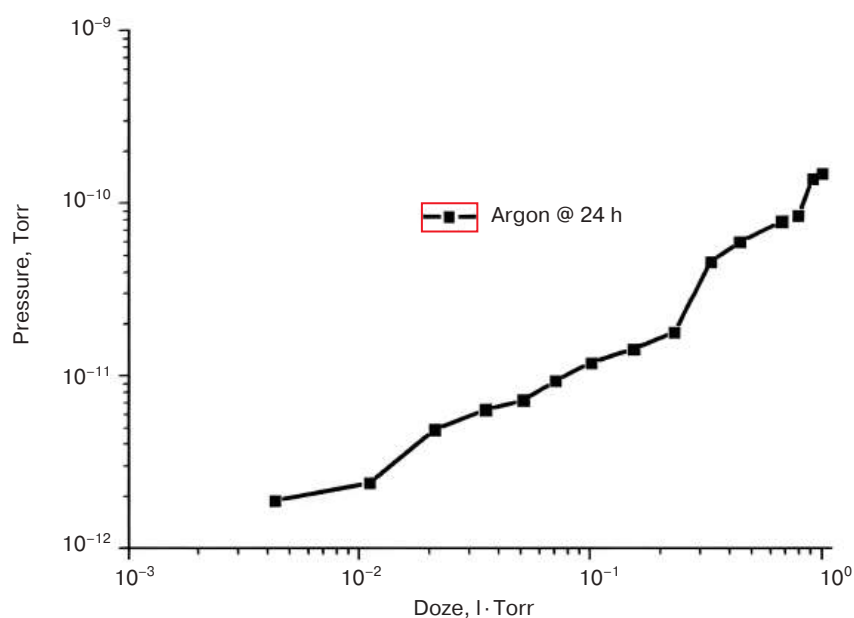


Рис. 5. Равновесное давление в системе от количества поглощенного аргона.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена конструкция комбинированного насоса, объединяющего в себе магнитоэрижаторный насос и высоковакуумный насос на базе нераспыляемого геттера.

2. Измерены быстрота откачки и сорбционная емкость комбинированного насоса для таких газов как водород, монооксид углерода, метан, азот, аргон.

3. Получена зависимость равновесного давления аргона от поглощенного количества аргона.

4. Данные насосы будут установлены в инжекционной части и накопителе ЦКП СКИФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ЦКП СКИФ.
<https://srf-skif.ru/>
2. Анашин В.В., Гусев Г.А., Жуков А.А., Краснов А.А., Кузьминых В.С., Пиминов П.А., Семенов А.М. // Вакуумная наука и техника: Материалы XXIX научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов. Москва: Электровакуумные технологии, 2022. С. 163.
3. Manini P., Maccallini P. // Proceedings of the 2017 CERN-Accelerator-School course on a Vacuum for Particle Accelerators. Glumslöv, 2017. P. 137.
4. Официальный сайт фирмы SAES Getters.
https://www.saesgetters.com/wp-content/uploads/sites/5/2024/02/NEXTorr_D1000_StarCell_2024-1.pdf
5. <http://www.polema.net/oblasti-primenenija.html>
6. Драничников А.Н., Краснов А.А., Семенов А.М. // Прикладная физика. 2017. № 2. С. 73.
7. Анашин В.В., Краснов А.А., Семенов А.М. // ПТЭ. 2020. № 6. С. 109.
8. Краснов А.А., Семенов А.М. // Известия РАН. Серия физическая. 2023. Т. 87. № 5. С. 646.
9. Краснов А.А., Семенов А.М. // Вакуумная наука и техника: материалы XXIX научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов. Москва: Электровакуумные технологии, 2022. С. 63.