

УДК 533.583.5

СОСРЕДОТОЧЕННЫЕ СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ НА БАЗЕ НЕРАСПЫЛЯЕМЫХ ГЕТТЕРОВ

© 2023 г. А. А. Краснов^{1, 2}, А. М. Семенов^{1, 3, *}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук”,
Новосибирск, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Новосибирский национальный исследовательский государственный университет”, Новосибирск, Россия

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Новосибирский государственный технический университет”, Новосибирск, Россия

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

Поступила в редакцию 28.11.2022 г.

После доработки 15.12.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

В настоящее время в вакуумных системах ускорителей заряженных частиц получили широкое распространение сосредоточенные вакуумные насосы на базе нераспыляемых геттеров. Данный тип насосов будет применяться в синхротроне 4+ поколения центра коллективного пользования “Сибирский кольцевой источник фотонов”. В Институте ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук были изготовлены и протестированы прототипы геттерных насосов с быстротой откачки по водороду 300, 600, 900 и 1300 л/с. Описаны конструкции насосов, а также результаты их испытаний.

DOI: 10.31857/S0367676522701186, EDN: AACEMB

ВВЕДЕНИЕ

Центр коллективного пользования “Сибирский кольцевой источник фотонов” (ЦКП “СКИФ”) – уникальный по своим характеристикам источник синхротронного излучения “4+” поколения с энергией 3 ГэВ и с рекордным эмиттансом пучка около $75 \text{ пм} \cdot \text{рад}$, который создается в рамках национального проекта “Наука и университеты” и программы “Академгородок 2.0” в наукограде Кольцово Новосибирской области. Для получения сверхвысокого вакуума необходимо применение не только магниторазрядных насосов, но и вакуумных насосов на базе нераспыляемых геттеров (NEG) [1].

Начиная с 2020 г. в Институте ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (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). Поэтому было принято решение применять триодный тип магниторазрядных насосов, т.к. у них более высокая быстрота откачки по инертным газам, чем у диодных насосов.

Разработка первых в СССР и России однопотенциальных неохлаждаемых триодных магниторазрядных насосов находится в завершающей стадии.

Но для того, чтобы иметь большую скорость откачки по водороду, который является доминирующим газом в сверхвысоком вакууме, одними магниторазрядными насосами не обойтись. И применение компактных насосов на базе нераспыляемых геттеров для этой задачи подходит как нельзя лучше.

Материалы в геттерных насосах связывают газ за счет хемосорбции. Таким образом, они должны быть химически активны по отношению к остаточным газам, обычно встречающимся в вакууме, таким как H_2 , CO , CO_2 и т.д.

Геттеры обычно подразделяются на два различных семейства: нераспыляемые геттеры и распыляемые геттеры.

NEG изготавливаются из химически активных металлов, таких как титан, цирконий, ванадий и их сплавы, и обычно формируются в виде прессованных или спеченных порошков [3]. Из-за их химической активности поверхность геттерных порошков легко пассивируется некоторыми монослоями оксидов и карбидов в процессе произ-

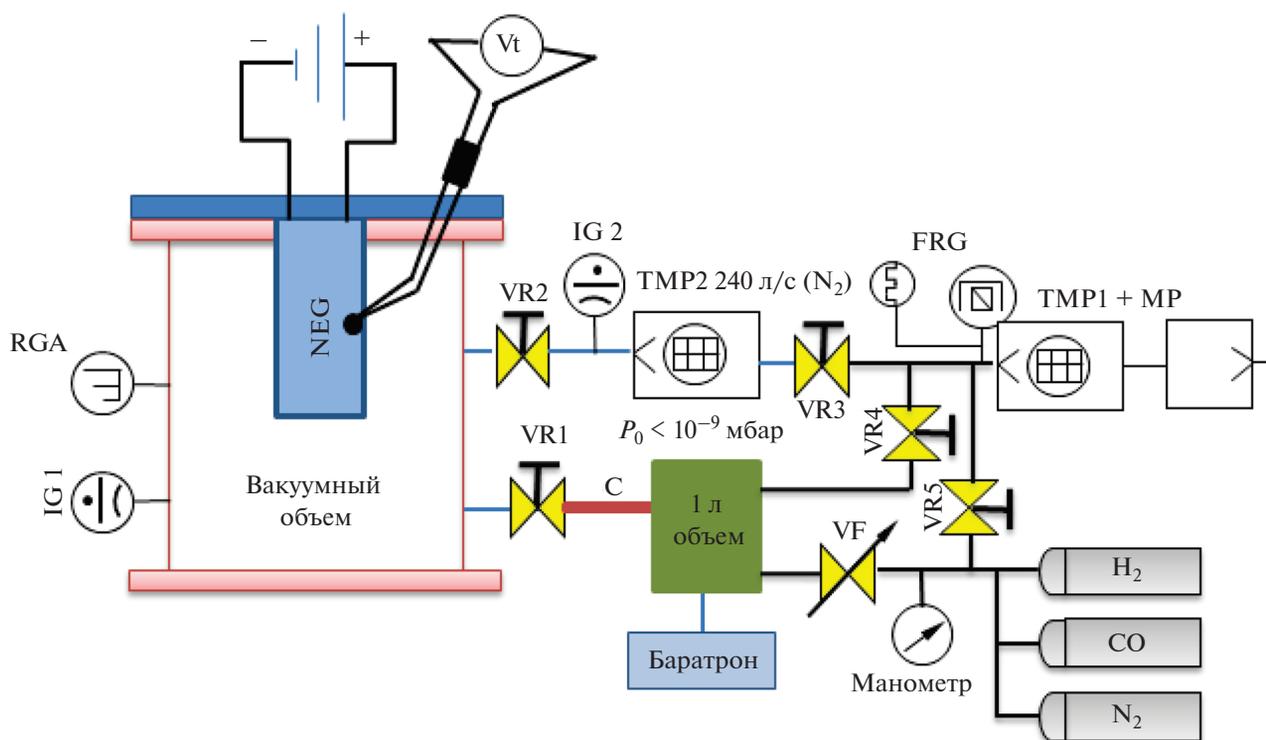


Рис. 1. Упрощенная схема вакуумного стенда. RGA – масс-спектрометр; IG1-2 – датчик давления с горячим катодом; FRG – широкодиапазонный датчик; геттер – тестируемый насос; C – капиллярный канал с молекулярной проводимостью; TMP1 + MP – турбомолекулярная станция откачки; TMP2 – турбомолекулярный насос; Баратрон – емкостной датчик давления; Манометр – стрелочный деформационный манометр; VF – шелевой нагнетатель; VR1, VR2, VR4, VR5 – цельнометаллические угловые клапаны; VR3 – аварийный электрический клапан.

водства. Это позволяет избежать дальнейшей реакции с атмосферными газами и защитить материал при работе на воздухе. После размещения в вакууме 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. Эффективность процесса диффузии сильно зависит от состава и микроструктуры геттера. В связи с этим температура и продолжительность активации могут существенно различаться от одного геттерного сплава к другому.

Нераспыляемые геттеры используются в основном в тех случаях, когда нежелательно распыление металлов в вакууме, либо отсутствует поверхность для нанесения металлической пленки.

Ключевой особенностью NEG является их большая скорость откачки на единицу объема. Как прямое следствие этой особенности, насосы на базе NEG, как правило, имеют компактный корпус и могут быть установлены в небольших или ограниченных по площади системах. Насосы NEG также особенно эффективны при откачке

водорода, основного остаточного газа в типичных системах сверхвысокого вакуума. Дополнительными особенностями являются малый вес, отсутствие вибрации (отсутствие движущихся частей), предельное энергопотребление, отсутствие технического обслуживания и незначительное влияние магнитного поля (магнитная проницаемость наиболее часто используемых геттеров < 1.001).

Основным недостатком всех геттеров является их избирательность при сорбции газов, т.е. химически пассивных газов, не вступающих в реакцию с геттерным материалом, таких как инертные газы (аргон, неон) и простые углеводороды (метан), так как химическая реакция невозможна [4].

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ

Активационные и газопоглощающие характеристики геттерных насосов измерялись на специализированной экспериментальной установке (рис. 1). Предварительная откачка системы производилась турбомолекулярной станцией, включающей в себя турбомолекулярный насос (TMP1) и безмасляный мембранный насос (MP). Высоковакуумная откачка осуществлялась турбомоле-

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

	Молекул. проводимость C , л/с	Эффективная быстрота откачки, $S_{эфф}$, л/с	Коэфф. чувствительности K_{IG1}	Коэфф. чувствительности K_{IG2}
Водород	$2.8 \cdot 10^{-3}$	28	2.3	2.3
СО	$7.6 \cdot 10^{-4}$	8.4	1	1
Аргон	$6.36 \cdot 10^{-4}$	7	0.77	0.74

кулярным насосом TMP2. От прорыва атмосферы со стороны TMP1 + MP был установлен аварийный электрический клапан VR3. 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 натекатель VF и капилляр С (молекулярная проводимость по водороду равна $2.8 \cdot 10^{-3}$ л/с). Откачка системы инъекции проводилась турбомолекулярной станцией через вакуумные клапаны VR4 и VR5. Для контроля давления напускаемого газа использовались стрелочный манометр и емкостной датчик давления "Baratron".

Измерение давления в системе выполнялось датчиком давления с горячим катодом IG1. Измерение парциальных давлений газов проводились при помощи квадрупольного масс-спектрометра RGA фирмы SRS (Стэнфорд, США). Датчик давления с горячим катодом IG2 необходим, чтобы контролировать поток газа, откачиваемого турбомолекулярным насосом TMP2.

До проведения экспериментов весь стенд прогревался при температуре 220–240°C, чтобы уменьшить десорбцию со стенок камеры. Также до проведения экспериментов были измерены эффективная быстрота откачки турбомолекулярного насоса TMP2, молекулярная проводимость капилляра и коэффициенты чувствительности датчиков давления с горячим катодом по каждому газу (H_2 , CO, Ar). В табл. 1 дается информация по этим величинам по каждому газу. После каждого вскрытия на атмосферу проводилась калибровка всех измерителей вакуума. В начале экспериментов клапан VR1 был закрыт. Затем клапан открывался, и инжестируемый 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 – канал с калиброванной проводимостью [л/с], P_{in} , P_{out} – давление на входе и выходе капилляра С [Торр].

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

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

где S_{NEG} – скорость откачки NEG насоса [л/с]; S_{TMP} – быстрота откачки турбомолекулярного насоса [л/с] и равной 32 л/с по водороду, 8.9 л/с по монооксиду углерода; C – молекулярная проводимость капиллярного канала [л/с]; $P_{IG1 after}$ – давление после напуска газа датчика давления IG1 [Торр]; $P_{IG1 before}$ – давление до напуска газа датчика давления IG1 [Торр]; K – коэффициент чувствительности.

Сорбционная емкость определялась как количество молекул, при поглощении которых быстрота откачки насоса снижается до 10% от первоначального уровня.

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

где Q_{total} – полный поток газа [л · Торр/с]; Q_{TMP} – поток газа, откачиваемый турбомолекулярным насосом [л · Торр/с]; t – время измерения [с].

Поток газа, который откачивается турбомолекулярным насосом, может быть найден как:

$$Q_{TMP} = S_{TMP}K(\Delta P_{IG1} - \Delta P_{IG2}), \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta P_{IG1} &= P_{IG1 after} - P_{IG1 before}, \\ \Delta P_{IG2} &= P_{IG2 after} - P_{IG2 before} \end{aligned} \quad (5)$$

$P_{IG1 after}$ – давление после напуска газа датчика давления IG1 [Торр]; $P_{IG1 before}$ – давление до напуска газа датчика давления IG1 [Торр]; $P_{IG2 after}$ – давление после напуска газа датчика давления IG2 [Торр]; $P_{IG2 before}$ – давление до напуска газа датчика давления IG2 [Торр].

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

ОПИСАНИЕ ПРОТОТИПОВ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

Фирма АО “Полема” давно производит нерасплавляемые 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].

Основные параметры насосов представлены в табл. 2. Насосы изготовлены из геттерных дисков. Внешний диаметр каждого диска 25 мм, толщина 1.6 мм, пористость 30%, внутренний диаметр 8 мм для размещения нагревателя. Химический состав неиспаряемого газопоглотителя Ti–Zr–Al. Диски установлены в 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 термпарой типа “К”. Для снижения мощности нагревателя в два раза используется один защитный экран снаружи. Геттерные насосы располагаются на фланцевых соединениях типа Conflat. Изображения геттерных насосов представлены на рис. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

До начала измерений весь стенд прогревался при температуре 230°C в течение 24 ч для уменьшения фонового вакуума. После охлаждения до комнатной температуры геттер активировался при максимальной температуре (650°C) в течение 20 ч, затем пассивировался в атмосфере воздуха в течение не менее 3 ч.

Измерения скорости откачки по водороду и сорбционной емкости по угарному газу выполнялись после активации геттеров при температуре от 350 до 650°C через каждые 50°C, но после охлаждения геттерного насоса до комнатной темпера-

туры. Сорбционная емкость по водороду оценивается порядка нескольких тысяч л · Торр, поэтому данной сорбционной емкости по водороду хватит того, как геттер будет пассивирован оксидами. К тому же чрезмерное насыщение геттера водородом приводит к разрушению и растрескиванию геттера.

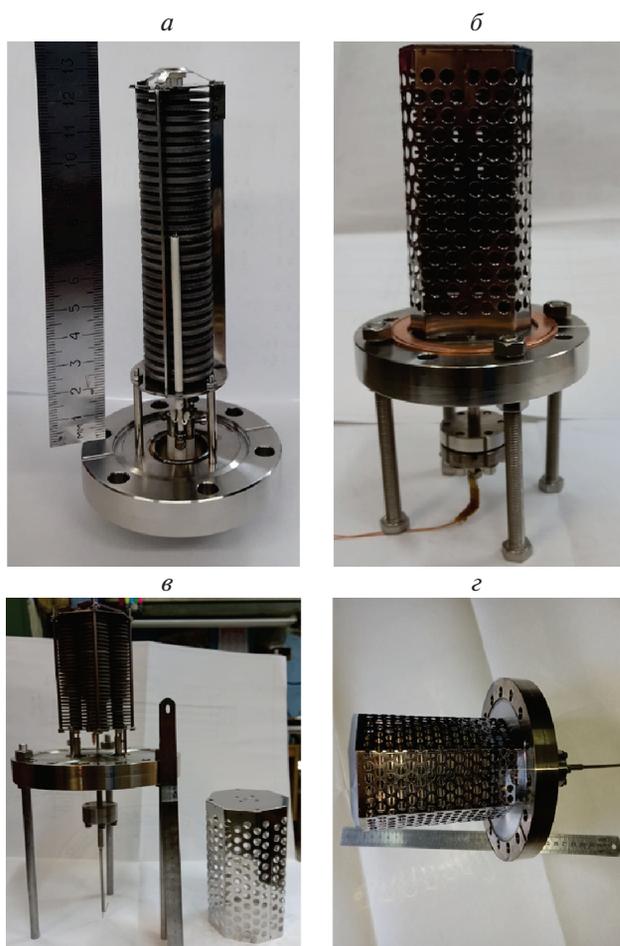


Рис. 2. Изображения геттерных насосов: NEG300 (а); NEG600 (б); NEG1000 (в); NEG1200 (г).

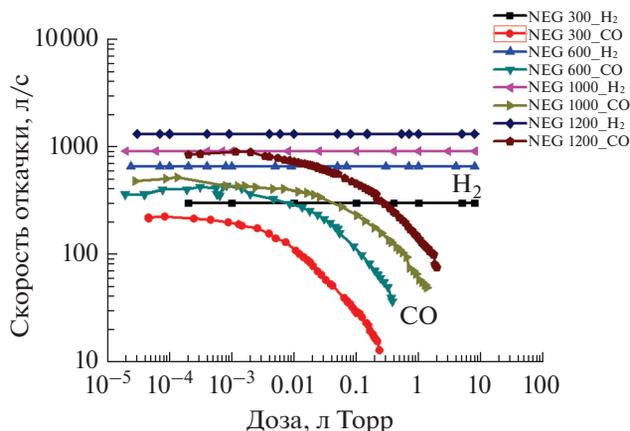


Рис. 3. Сорбционная емкость геттеров для водорода и монооксида углерода.

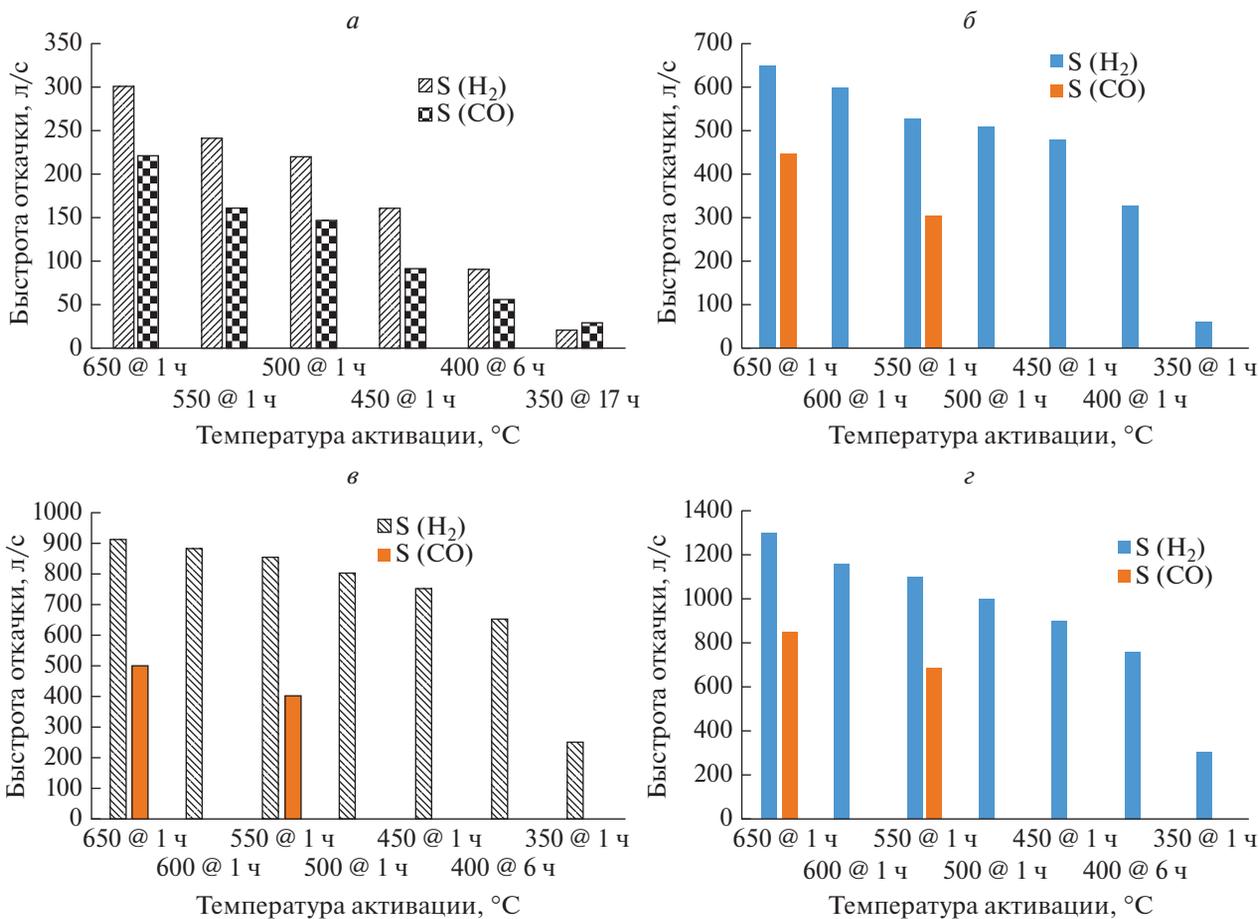


Рис. 4. Скорость откачки геттерных насосов по водороду и CO при различных температурах активации.

Сорбционная емкость по водороду и монооксиду углерода для каждого геттерного насоса от температуры активации представлены на рис. 3.

Скорости откачки по водороду и монооксиду углерода при различных температурах активации для четырех геттерных насосов показаны на рис. 4.

Таблица 3. Экспериментальные результаты для геттерных насосов производства ИЯФ СО РАН и параметры насосов фирмы SAES Getters

	NEG насос	Мах скорость откачки по H ₂ , л/с	Мах скорость откачки по CO, л/с	Сорбционная емкость по CO, л · Торр	Мощность активации при 650°C, Вт	Мощность активации при 550°C, 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	CapaciTorr 200	200	125	0.6	—	58	0.84
	CapaciTorr 1000	1000	600	4	—	190	0.88

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были изготовлены и протестированы прототипы вакуумных насосов на базе нераспыляемых геттеров с быстротой откачки 300, 600, 900 и 1300 л/с по водороду. Данные насосы соответствуют зарубежным аналогам по своим характеристикам, таким как температуре активации, скорости откачки и сорбционной емкости. Газопоглотители фирмы АО “Полема” могут быть применены не только в ускорительной технике, но и в плазменных установках.

В работе использовалось оборудование ЦКП “СЦСТИ” на базе УНУ “Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000” в ИЯФ СО РАН. Работа выполнена

при поддержке гранта Минобрнауки № 075-15-2021-1359/2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Krasnov A.* // Proc. SFR'20 (Novosibirsk, 2020). Art. No. 138.
2. *Semenov A., Anashin V., Krasnov A.* // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2299. Art. No. 020010.
3. *Saksaganskii G.L.* // In: Getter and getter-ion vacuum pumps. Chur: Harwood Academic Publishers, 1994. P. 258.
4. *Manini P., Maccallini E.* // Proc. CAS (Glumslöv, 2017). P. 207.
5. <http://www.polema.net/oblasti-primenenija.html>.
6. *Драничников А.Н., Краснов А.А., Семенов А.М.* // Прикл. физ. 2017. № 2. С. 73.
7. *Анашин В.В., Краснов А.А., Семенов А.М.* // ПТЭ. 2020. № 6. С. 109; *Anashin V.V., Krasnov A.A., Semenov A.M.* // Instrum. Exp. Tech. 2020. V. 63. No. 6. P. 893.
8. <https://www.saesgetters.com/products-functions/products>.

The lumped ultra-high vacuum pumps based on non-evaporable getters

A. A. Krasnov^{a, b}, A. M. Semenov^{a, c, *}

^a*Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia*

^b*Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090 Russia*

^c*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073 Russia*

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

The 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 NEG prototypes with pumping speed of 300, 600, 900 and 1300 L/s for hydrogen were created and investigated. The pumps construction and test results are presented here.