

Исследования нераспыляемых геттеров для применения в инжекторах атомов водорода для установок термоядерного синтеза

А. Н. Драничников, А. А. Краснов, А. М. Семенов

В настоящее время в Институте ядерной физики СО РАН ведутся работы по созданию инжекторов атомов водорода с энергией 0,5–1 МэВ, которые необходимы для будущих установок управляемого термоядерного синтеза. Часть вакуумных насосов инжектора нейтралов предполагается установить на высоком потенциале, что усложняет их эксплуатацию и требует новых подходов к вакуумной откачке. В качестве альтернативы для откачки баков инжекторов, находящихся под высоким потенциалом, было предложено использовать нераспыляемые геттеры (НЕГ), уже широко используемые в ускорительной технике. В настоящей статье приводятся первые результаты исследований насосов на базе нераспыляемых геттеров, а также приведены их оптимальные характеристики в интересах их использования в плазменных установках с большими потоками откачиваемого водорода.

Ключевые слова: вакуумная откачка; нераспыляемый геттер; инжектор атомов водорода; УТС.

Введение

Для нагрева и диагностики плазмы в магнитных ловушках широко используются пучки нейтральных частиц, получаемые в инжекторах нейтралов [1–4] с помощью перезарядки ускоренных положительных или отрицательных ионов. Получение заряженных пучков и их перезарядка в нейтралы сопровождается большими сопутствующими потоками газа, тогда как транспортировка пучков к мишени и магнитной ловушке требует высокого вакуума. В последнее время в качестве основного средства откачки водорода инжекторов нейтральных пучков в ИЯФ используются криосорбционные насосы конденсационного типа, охлаждаемые жидким гелием и криокуллерами на основе цикла Гиффорда-МакМагона, а также

крионасосы с быстротой действия сотни тысяч литров в секунду по водороду [1, 5].

Применение криосорбционных насосов в инжекторах нейтралов затруднено из-за ограниченного пространства, доступного для размещения откачивающей системы вблизи области транспортировки пучка, и может быть вообще экономически невыгодным, поскольку требует постоянного поддержания криогенных температур при значительной тепловой нагрузке. В противном случае даже при незначительном отогреве криопанели сконденсированный на ней водород начинает интенсивно десорбироваться. Другим принципиальным ограничением является расположение источника пучка и тракта транспортировки под высоким напряжением (до одного мегавольта), что требует специальной высоковольтной развязки между крионасосами инжектора и системой подачи/приема жидкого и газообразного гелия.

Одним из альтернативных решений обеспечения необходимого динамического давления в вакуумных камерах при значительных газовых нагрузках является использование нераспыляемых геттеров (НЕГ). Первые эксперименты по использованию подобных геттеров в условиях, необходимых для откачки установок термоядерного синтеза, были предприняты ещё в 1981 г. [6, 7]. В данных работах были рассмотрены различные материалы в качестве потенциальных нераспыляемых геттеров и изучены их газопоглощательные свойства в отсутствие какого-либо излучения

Драничников Александр Николаевич¹, ведущий инженер.
Краснов Александр Анатольевич^{1,2}, заведующий лабораторией, к.ф.-м.н.

Семенов Алексей Михайлович^{1,3}, научный сотрудник, к.т.н.
¹ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН.
Россия, 630090, Новосибирск, проспект ак. Лаврентьева, 11.
Тел. +7 (383) 329-42-02.

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

² Новосибирский государственный университет.
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2.

³ Новосибирский государственный технический университет.
Россия, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20.

Статья поступила в редакцию 16 февраля 2017 г.

© Драничников А. Н., Краснов А. А., Семенов А. М., 2017

и при облучении ионами водорода и гелия (с энергиями в диапазоне $12 \div 30$ кэВ), а также квантами излучения (энергия $5 \div 10^3$ эВ). Для полномасштабных испытаний по исследованию ресурса работы и эффективности откачки геттерных панелей в реальных условиях были предложены пять геттерных панелей WP 1250/2 фирмы SAES Getters с суммарной быстротой действия 75000 л/с по водороду [7], которые были установлены в исследовательском инжекторе МИН с вакуумным объемом 20 м^3 . За неполные 40 лет с момента первых попыток использования различных геттеров в плазменных установках в мире появилось большое множество сплавов и сочетаний материалов, потенциально перспективных для получения высокого вакуума при больших газовых нагрузках. Одними из таких образцов являются НЭГ на базе Ti-Zr-Al фирмы ООО «Полема» (Россия) [8] и Zr-V-Fe фирмы SAES Getters (Италия) [9].

Целью данной работы являлось исследование газопоглощающих и активационных свойств геттеров на базе Ti-Zr-Al и Zr-V-Fe в интересах создания насосов на базе НЭГ, а также определение оптимальных характеристик таких насосов при их использовании в плазменных установках с большими потоками откачиваемого водорода.

Конструкция и состав испытываемых геттеров

Все испытания проводились в условиях повышенной газовой нагрузки на инжекторе нейтральных пучков [7], разрабатываемом в ИЯФ.

Геттерные панели WP 1250/2 фирмы SAES Getters используют нераспыляемый геттер St'707, состоящий из Zr (70 %) – V (24,6 %) – Fe (5,4 %). Для увеличения площади рабочей поверхности геттера и повышения скорости откачки панель имеет ступенчатую зигзагообразную форму [9]. Паспортная скорость откачки панели составляет до 1000 л/с по водороду. Геттеры начинают эффективно откачивать газы после активации, т. е. после нагрева при соответствующей температуре ($400 \div 450$ °С) в течение длительного времени (обычно 24 часа) под вакуумом. Нагрев геттерной панели достигается пропуском переменного или постоянного тока (сила тока 42 А при потребляемой мощности 247 Вт) [9].

В качестве альтернативы и удешевления всего устройства были исследованы свойства геттерных материалов Ti-Zr-Al российской фирмы АО «Полема» [8, 10]. Температура активации Ti-Zr-Al здесь рекомендуется в диапазоне $623 \div 673$ К. Максимальная сорбционная емкость по водороду, равная $54,4$ (л Торр)/г, достигается при температуре 473 К и давлении 10^{-5} Торр, а соответствующая

скорость откачки по водороду при той же температуре равна $6,6$ л/(с г). Конструктивно геттерный материал Ti-Zr-Al изготавливается в виде таблеток диаметром 13,7 мм и толщиной 3,5 мм [8, 10].

Конструкция опытного геттерного насоса-картриджа, созданного в ИЯФ СО РАН на базе Ti-Zr-Al-таблеток, показана на рис. 1.



Рис. 1. Опытный образец насоса-картриджа на основе таблеток из Ti-Zr-Al.

Картридж представляет собой цилиндр, имеющий внешний диаметр 90 мм и длину 140 мм. В картридже размещаются около 300 таблеток с общей массой 0,450 кг. Таблетки располагаются с зазором $1 \div 1,5$ мм между цилиндрическими сетками. Для активации геттера таблетки нагреваются встроенным резистивным нагревателем (5 А, 150 Вт). Геометрическая активная площадь геттера (т. е. внешняя стенка цилиндра, поскольку торцы картриджа были закрыты для обеспечения равномерного прогрева таблеток) равна 395 см^2 . Нагреватель находился внутри и по центру картриджа, причем крепился к фланцу, на котором располагался сам картридж. Для активации геттеров использовался источник питания постоянного тока (50 А, 1,5 кВт). Температура во время активации/регенерации измерялась термопарой типа «хромель-копель».

Экспериментальная установка и методы измерения

Активационные и газопоглощающие характеристики насосов-картриджей с геттерными материалами измерялись на экспериментальной установке, схема которой показана на рис. 2. Предварительная откачка системы производилась турбомолекулярной станцией TMP2, включающей в себя турбомолекулярный насос, безмасляный мембранный насос и цельнометаллический клапан VR7. Высоковакуумная откачка осуществлялась

турбомолекулярным насосом TMP. Измерение форвакуума и высокого вакуума осуществлялось широкодиапазонным датчиком давления Pfeiffer, расположенным на откачной станции.

Напуск газа в систему выполнялся через игольчатый натекатель VF и канал с калиброванной проводимостью C (молекулярная проводимость по водороду равна 3×10^{-3} л/с). Откачка системы инжекции проводилась турбомолекулярной станцией через вакуумные клапаны VR2 и VR3, VR4. Для контроля давления напускаемого газа использовались стрелочный манометр и мембранный датчик давления Baratron.

Измерение давления в системе выполнялось датчиком давления с горячим катодом IG1, а также магниторазрядным датчиком давления PM1. Измерение парциальных давлений газов проводились при помощи квадрупольного масс-спектрометра PRIZMA.

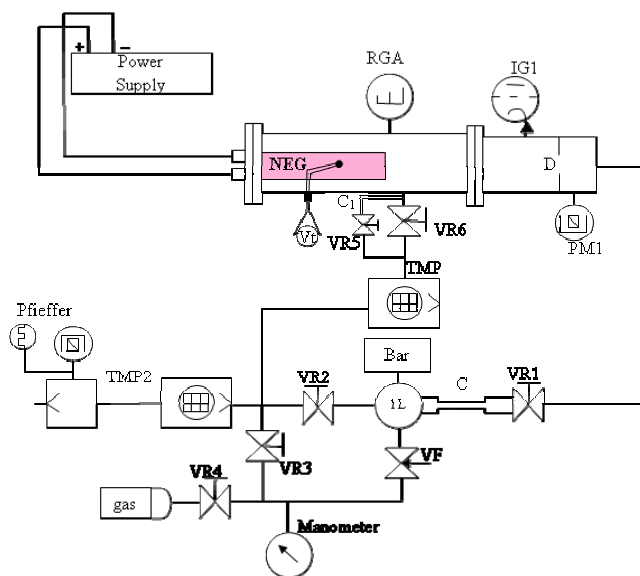


Рис. 2. Схема установки: D – диафрагма; C – трубка (капилляр) с низкой молекулярной проводимостью; VR1 – цельнометаллический проходной клапан, VR2÷4 – вакуумные клапаны; VR6 – цельнометаллический вакуумный клапан; VF – натекатель; TMP1 – турбомолекулярный насос; TMP2 – откачная станция (мембранный + турбомолекулярный насосы); RGA – квадрупольный масс-спектрометр; Pfeiffer – ионизационная лампа + терморазрядный преобразователь; PM1 – магниторазрядная лампа с холодным катодом; IG1 – ионная лампа с горячим катодом; Bar – мембранный датчик давления «Baratron»; gas – газовый баллон; IL – литровый объем; NEG – нераспыляемый геттер, Vt – терморазрядный датчик, тип хромель-копель.

После каждого вскрытия на атмосферу проводилась калибровка всех измерителей вакуума. В начале экспериментов клапан VR1 был закрыт. Затем клапан открывался, и инжектируемый водород начинал поступать в тест-камеру через канал с калиброванной проводимостью. Газовый поток в тест-камеру определяется выражением:

$$Q = C \times (P_{in} - P_{out}),$$

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

Быстрота откачки геттера может быть определена в течение напуска газа соотношением:

$$S = \frac{Q}{\Delta P_{IG1}},$$

где динамическое давление в тест-камере $\Delta P_{IG1} = P_{IG1 \text{ напуск}} - P_{IG1 \text{ фон}}$ определялось как разность между давлением, измеренным в процессе напуска водорода и «фоновым» давлением без инжектируемого газа в начале экспериментов. Количество адсорбированных молекул водорода определялось интегрированием потока водорода по времени.

Результаты экспериментов

В случае с геттером St'707 важно было проверить равновесное давление по водороду в зависимости от сорбционной емкости при различных потоках напускаемого газа (от 10^{-6} до 3×10^{-3} (л Торр)/с). Также одним из важных параметров геттера является измерение равновесного давления после регенерации посредством длительного прогрева при температуре активации. Время регенерации геттера St'707 составляет при температуре активации $673 \div 723$ К порядка $24 \div 32$ часов. При этом высвобождается 90 % поглощенного газа. Для того чтобы убедиться в возможностях геттера St'707, было проведено четыре цикла «активация/регенерация/пассивация». Быстрота откачки геттера оставалась неизменной после активаций и равнялась 1000 л/с. Равновесное давление оказалось даже лучше паспортных данных для геттера St'707 [9].

Поскольку для другого геттера, а именно, Ti-Zr-Al газопоглощающие характеристики (по паспорту) даются после активации при $623 \div 673$ К и при непрерывном поддержании температуры порядка 473 К [8, 10], то это может быть экономически невыгодным в ряде случаев. Необходимо было определить оптимальную температуру активации геттера, при которой быстрота действия и сорбционная емкость геттерного насоса будут максимальны даже при комнатной температуре. Для этого была проведена следующая серия экспериментов:

1) активация № 1 при 573 К (измерение быстроты откачки и сорбционной емкости по водороду)/пассивация (24 часа на воздухе при атмосферном давлении);

2) активация № 2 при 623 К (измерение скорости откачки и сорбционной емкости по водороду);

3) регенерация № 1 при 673 К (измерение скорости откачки и сорбционной емкости по водороду)/пассивация (72 часа под атмосферой воздуха);

4) активация № 3 при 773 К (измерение скорости откачки и сорбционной емкости по водороду);

5) регенерация № 2 при 773 К (измерение скорости откачки и сорбционной емкости по водороду);

6) регенерация № 3 при 793 К /пассивация (12 часов под атмосферой воздуха); активация (регенерация) осуществлялись в течение 24 часов;

7) исследование скорости откачки геттера при напуске водорода через каждые 50 К во время активации после высоковакуумного отжига при 773 К в течение 24 часов.

На рис. 3 показано квазиравновесное давление водорода при комнатной температуре после активации/регенерации, но до напуска водорода, а на рис. 4 представлено квазиравновесное давление в системе после насыщения геттера водородом при комнатной температуре (в зависимости от температуры активаций/регенераций). Для сравнения приведены значения также для геттерного картриджа St'707.

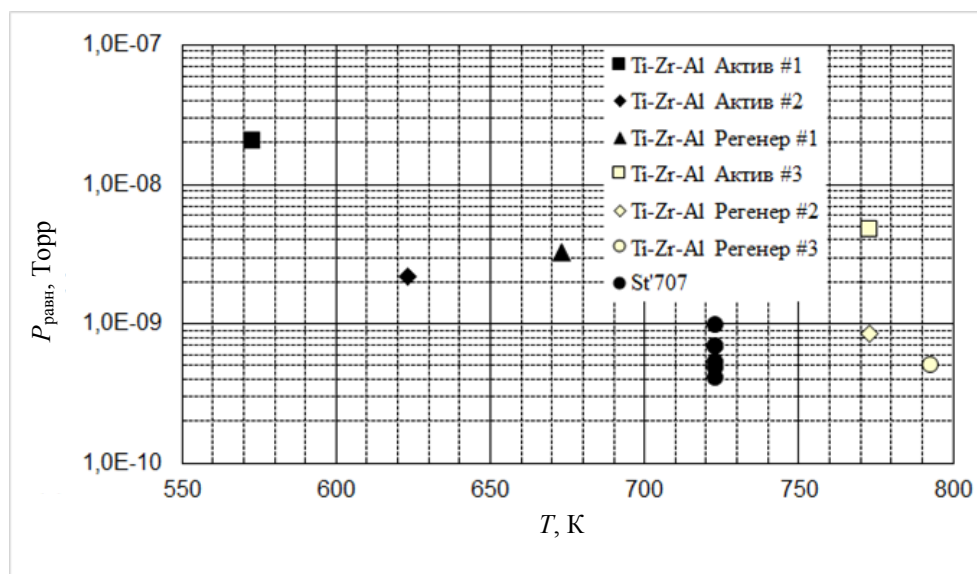


Рис. 3. Зависимость равновесного давления $P_{\text{равн}}$ для геттерного насоса на базе Ti-Zr-Al от температуры T активации/регенерации. Для сравнения приводятся данные для картриджа фирмы SAES Getters для нескольких циклов активации/регенерации.

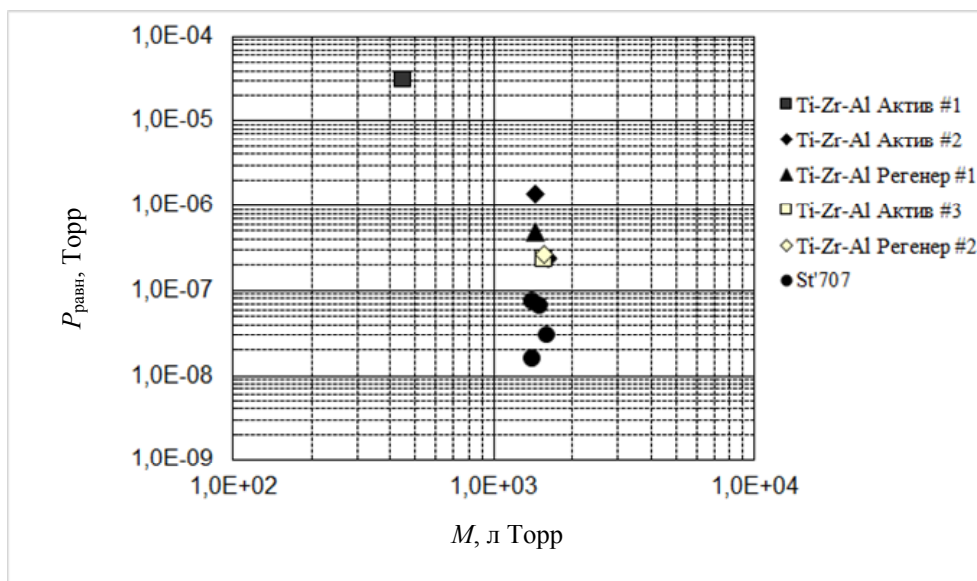


Рис. 4. Зависимость равновесного давления $P_{\text{равн}}$ для геттерных насосов на базе Ti-Zr-Al и St'707 от количества поглощенного водорода M .

Было найдено, что быстрота откачки геттера остается неизменной во всем диапазоне напускаемого потока газа (от 10^{-6} до 10^{-2} л Торр)/с) и достигает максимума порядка 2,2 л/(с см²) при температуре активации 673 К после высоковакуумного отжига таблеток Ti-Zr-Al при 773 К в течение 24 часов. В диапазоне температур от 423 до 623 К быстрота откачки уменьшается на 15 % по сравнению с максимальным значением.

Обсуждение результатов

К сожалению, вакуумная гигиена отечественных производителей газопоглотителей далека от совершенства. Из-за сильного гажения геттера нельзя было с полной уверенностью утверждать, что геттер был полностью активирован во время первого цикла активаций при 623÷673 К. Последующие активации/регенерации при высоковакуумном прогреве при 773 К, во время которых фактически было проведено глубокое обезгаживание геттера, полностью подтвердили данное предположение.

При повторном цикле активаций максимальная быстрота откачки была достигнута уже при температурах 623÷673 К. Таким образом, для применения в высоковакуумных системах геттер Ti-Zr-Al фирмы ОАО «Полема» необходимо прогреть на специализированном высоковакуумном стенде при температуре 773 К в течение 24 часов.

Испытания на инжекторе атомов водорода H⁺

Для подтверждения результатов исследований на вакуумном стенде необходимо было провести испытания на работающем инжекторе атомов водорода. Для предварительной откачки бака объемом 2000 л используется турбомолекулярный насос производительностью 1000 л/с (для азота). Основная же откачка осуществлялась при помощи криопанелей при температуре 3,2 К, обеспечивающим суммарную скорость откачки 10^5 л/с по водороду. Поскольку картриджи фирмы SAES Getters обладают рядом преимуществ по сравнению с геттерами фирмы «Полема» (чище, ниже равновесное давление по водороду после активации, сразу готовы к эксплуатации на установке), то на инжектор С-2U (Tri Alpha Energy, США) были установлены стационарно десять таких картриджей, причем их суммарная скорость откачки оказалась равна 10 % от скорости откачки криопанелей. Данная система откачки позволяет получать вакуум в фоновом режиме порядка 10^{-9} ÷ 10^{-8} Торр, а при инъекции водорода (поток 10 л Торр)/с, длительность импульса 10 мс) обеспечивался вакуум 5×10^{-8} Торр.

Измерение суммарной быстроты действия геттеров проводилась после активации геттеров при потоках водорода от 0,12 л Торр)/с до 0,63 л Торр)/с при помощи измерителя расхода газа (Mass-Flow Controller, MKS, США). Из-за того что турбомолекулярный насос по технике безопасности на ночь выключался, а криопанели не были использованы в начале экспериментов при измерении быстроты действия геттеров, вакуум в инжекторе к утру падал до 10^{-4} Торр и, соответственно, картриджи успевали пассивироваться. Каждое утро приходилось заново проводить активацию картриджей. При этом важно было на это тратить как можно меньше времени, но при сохранении максимально возможной скорости откачки геттера. Скорость откачки геттера в зависимости от времени активации представлена в таблице.

Таблица

Зависимость скорости откачки геттера St'707 от времени активации. Поток водорода от 0,12 до 0,63 (лТорр)/с

	Время активации, ч			
	24	3	1	0,5
S, л/с	10^4	10^4	10^4	5×10^3

Заключение

В работе были изучены газопоглощающие и активационные свойства отечественного геттера Ti-Zr-Al при различных температурах активации и потоках инжектируемого водорода. Было найдено, что максимальная быстрота откачки геттера достигается при температуре активации 673 К, но после высоковакуумного отжига при 773 К в течение 24 часов.

В прямых высоковакуумных экспериментах успешно применены нераспыляемые геттеры фирмы SAES Getters для получения высокого вакуума в инжекторе отрицательных атомов водорода. Получено минимальное время активации картриджа на базе геттера St'707, при которой сохраняется максимальная быстрота действия геттерного насоса-картриджа.

Испытания показали, что нераспыляемые геттеры (как St'707, так и Ti-Zr-Al) могут быть использованы в качестве альтернативного способа откачки в будущих мощных инжекторах нейтральных атомов водорода, но требуют к себе более бережного обращения, чем средства криооткачки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Deichuli P. P., Davydenko V. I., Belov V. P., Dranichnikov A. N., Ivanov A. A. / 14th Intern. Conference on Ion Sources, 12–16 September, 2011, Giardini Naxos, Italy.

2. Benvenuti C. and Chiggiato P. // CERN-MT/95-10.
3. Benvenuti C. and Chiggiato P. // Vacuum. 1993. Vol. 44. No. 5-7. P. 511.
4. Семенов А. М. // Прикладная физика. 2016. № 5. С. 65.
5. Deichuli P., Davydenko V., Belov V., Dranichnikov A. N., Ivanov A. A. // Rev. Sci. Instrum., 2012. Vol. 83. No. 2. Pt. 2. P. 02B114.
6. Белялиев А. К., Пустовойт Ю. М., Столяров В. Л. // Препринт ИАЭ 3551.-Б., 1982.
7. Пустовойт Ю. М., Столяров В. Л. / Труды II Все-союзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов (23-25 июня 1981 г., Ленинград), НИИЭФА, Л, 1982. Т. 4. С. 53.
8. <http://www.polema.net/gazopoglotiteli-ti-ti-zr-al.html>
9. SORB AC Getter Wafer Modules and Panels. http://www.saesgetters.com/sites/default/files/Sorb-AC%20Wafer%20Modules_0.pdf
10. Полунина А. А. Диссертация кандидата технических наук. МГИЭИМ, 2008.

PACS: 07.30.-t, 68.60.-p

Research of NEG for application in injectors of hydrogen atoms for installations of thermonuclear synthesis

A. N. Dranichnikov¹, A. A. Krasnov^{1,2}, and A. M. Semenov^{1,3}

¹ Budker Institute of Nuclear Physics
11 Lavrentieva av., 630090, Novosibirsk, Russia
E-mail: A.M.Semenov@inp.nsk.su

² Novosibirsk State University, 630090, Novosibirsk, Russia
2 Pirogova str., Novosibirsk, 630090, Russia

³ Novosibirsk State Technical University
20 K. Marksa av., Novosibirsk, 630073, Russia

Received February 16, 2017

In current time, investigations are carried out for generation of atomic hydrogen beam injectors with energy of 0.5–1 MeV in Budker Institute of Nuclear Physics (Siberian Branch of Russian Academy Science). These injectors are required for future facilities of nuclear fusion. A part of vacuum pumps will be installed under high potential. It complicates its maintenance and requires the new methods to the pumping down. Non-evaporable getters (NEG) were suggested to use as alternative method for pumping down of injector vessels, which are located under high potential. These NEG are widely employed in accelerator facilities. In given paper, the investigation results and NEG pump properties are given for its application in a plasma setup with a huge hydrogen flow.

Keywords: vacuum pumping down, NEG, atomic hydrogen beam injector, controlled thermonuclear fusion.

REFERENCES

1. P. P. Deichuli, V. I. Davydenko, V. P. Belov, A. N. Dranichnikov, and A. A. Ivanov, *14th Intern. Conference on Ion Sources* (12-16 September, 2011, Giardini Naxos, Italy).
2. C. Benvenuti and P. Chiggiato, CERN-MT/95-10.
3. C. Benvenuti and P. Chiggiato, *Vacuum* **44** (5-7), 511 (1993).
4. A. M. Semenov, *Prikl. Fiz.*, No. 5, 65 (2016).
5. P. Deichuli, V. Davydenko, V. Belov, A. N. Dranichnikov, and A. A. Ivanov, *Rev. Sci. Instrum.*, **83** (2), Part 2, 02B114 (2012).
6. A. K. Belyaliev, Yu. M. Pustovoyt, and V. L. Stolyarov, Pre-print NRC “Kurchatov Institute”, No. 3551 (1982).
7. Yu. M. Pustovoyt and V. L. Stolyarov, *Proceeding II All-USSR Conference for Engineering Problems of Fusion Reactors* (23-25 June 1981, St. Petersburg, SIIÉPA, 1982). Vol. 4. P. 53.
8. <http://www.polema.net/gazopoglotiteli-ti-ti-zr-al.html>
9. SORB AC Getter Wafer Modules and Panels. http://www.saesgetters.com/sites/default/files/Sorb-AC%20Wafer%20Modules_0.pdf
10. A. A. Polunina, *Dissertation (MSIEM, 2008)*.