

ЛАБОРАТОРНАЯ  
ТЕХНИКА

УДК 533.599

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ВАКУУМНОГО  
НАСОСА ИЗ ДИСКОВ СПЕЧЕННОГО НЕРАСПЫЛЯЕМОГО ГЕТТЕРА  
ДЛЯ ВОДОРОДА И ЕГО ИЗОТОПОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В  
ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВКАХ**

©2025 г. А. А. Краснов<sup>a, b</sup>, А. М. Семенов<sup>a, c</sup>

*<sup>a</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера*

*Сибирского отделения Российской академии наук*

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

*<sup>b</sup>Новосибирский государственный университет*

*Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1*

*<sup>c</sup>Новосибирский государственный технический университет*

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

Поступила в редакцию 11.04.2025 г.

После доработки 25.04.2025 г.

Принята к публикации 21.05.2025 г.

Представлены измеренные удельные вакуумные характеристики нераспыляемого геттера Ti–Zr–Al для водорода и его изотопов для применения в установках термоядерного синтеза. В вакуумной системе инжекторов нейтральных пучков требуются скорости откачки водорода и дейтерия в миллионы литров в секунду при давлении  $10^{-5}$  торр. Были получены удельные скорости откачки порядка  $0.81 \text{ л}/(\text{с}\cdot\text{см}^2)$  для водорода и  $0.44 \text{ л}/(\text{с}\cdot\text{см}^2)$  для дейтерия для геттера Ti–Zr–Al, а также измерена сорбционная емкость по водороду, которая равняется более  $6 \text{ л}\cdot\text{торр}/\text{г}$ .

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Амбициозная цель исследований последних десятилетий – создание реактора на основе управляемого термоядерного синтеза. Над этой проблемой работает большое количество исследовательских коллективов. В термоядерной реакции легкие атомные ядра объединяются в более тяжелые. Этот процесс происходит в плазме при ее горении. Термоядерный синтез происходит в условиях очень высоких температур, так как для горения требуется нагрев

плазмы до ста миллионов градусов Кельвина. Реактор на основе управляемого термоядерного синтеза способен обеспечить человечество дешевой энергией на долгие годы [1].

Физики рассматривают чистый дейтерий как один из возможных вариантов топлива для управляемого термоядерного синтеза – неограниченный ресурс, который буквально падает на нас с неба. Каждый кубический метр воды содержит тридцать три грамма дейтерия, этот источник энергии практически неисчерпаем. В последнее время в ИЯФ СО РАН в качестве основных средств откачки водорода из инжекторов нейтрального пучка используются криосорбционные насосы конденсационного типа, охлаждаемые жидким гелием, и криокулеры на основе цикла Гиффорда–Мак-Магона, а также крионасосы с производительностью сотни тысяч литров в секунду для водорода. Инжекция нейтрального пучка (NBI) – один из методов нагрева плазмы внутри термоядерной установки, состоящей из пучка нейтральных частиц высокой энергии, которые могут входить в удерживающее магнитное поле. Когда эти нейтральные частицы ионизируются при столкновении с частицами плазмы, они удерживаются в плазме магнитным полем и могут передавать большую часть своей энергии при дальнейших столкновениях с плазмой. До настоящего времени все системы NBI были основаны на пучках положительных ионов-предшественников. Использование криосорбционных насосов в инжекторах нейтрального пучка затруднено из-за ограниченного пространства для размещения системы откачки вблизи зоны транспортировки пучка. Поэтому использование криосорбционных насосов может быть экономически невыгодно, так как требует постоянного поддержания криогенных температур при значительной тепловой нагрузке. В противном случае даже при небольшом нагреве криопанели сконденсировавшийся на нем водород начинает десорбироваться. Одним из основных ограничений является расположение источника пучка и канала транспортировки под высоким напряжением (до одного мегавольта), что требует высоковольтной развязки между крионасосами и системой подачи/приема жидкого и газообразного гелия [2].

Поскольку газопоглощающие свойства геттеров начинают проявляться после активации, что требует нагрева геттера до температуры активации, геттерные насосы являются принципиальным решением по замене криогенных насосов в термоядерных исследованиях. В частности, для вакуумной системы инжекторов нейтрального пучка, где газ впрыскивается непрерывно, требуется высокая скорость откачки водорода и большая сорбционная емкость.

Вакуумные специалисты располагают большим количеством различных средств получения вакуума на основе геттеров, универсального решения на данный момент не существует. Это сосредоточенные насосы (картриджи из нераспыляемых геттеров (НГ), устанавливаемые через соединительные фланцы внутри вакуумной камеры) и распределенные

насосы (НГ, нанесенные на внутреннюю поверхность стенок вакуумных камер). Для сорбции большей части активных газов, за исключением инертных газов и метана, в качестве сорбционных вакуумных насосов используются нераспыляемые геттеры в различных формах [3, 4]. Сплавы НГ хорошо изучены на предмет возможности применения в сверхвысоком вакууме, например, Ti, Zr, V, Hf, редкоземельные элементы и т. д. [5]. Впервые они были использованы в сверхвысоковакуумной системе, а также в Большом электрон-позитронном коллайдере еще в 1970-х годах [6]. С тех пор нераспыляемые геттеры стали неотъемлемой частью вакуумной технологии.

Среди активных газов, взаимодействующих с геттером, водород и его изотопы ведут себя своеобразно. Они сорбируются обратимым образом. В типичных условиях водород диссоциирует на твердой поверхности и диффундирует в материал геттера. Это обеспечивает стабильную скорость откачки во времени, поскольку вклад в сорбционную емкость вносит основная масса материала, а не только поверхность. Пределом сорбционной емкости для элементов НГ является растрескивание из-за насыщения водородом с концентрациями выше рекомендуемых при циклических нагрузках. Поведение в условиях сорбции и регенерации позволяет применять нераспыляемые геттеры в установках, требующих большой откачки водорода.

В настоящей работе представлены измеренные удельные вакуумные характеристики нераспыляемого геттера Ti-Zr-Al для водорода и его изотопов для применения в установках термоядерного синтеза.

## 2. ОПИСАНИЕ ГЕТТЕРНОГО НАСОСА

Для повышения точности измерения газопоглощающих свойств нераспыляемого геттера Ti-Zr-Al производства ООО “Полема” [7] был изготовлен вакуумный насос, названный NNG-1,3. Основные параметры геттерного насоса представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Основные параметры прототипа геттерного насоса

Наименование	Температура активации, °С	Площадь поверхности НГ, см <sup>2</sup>	Вес геттера, г	Пористость, %	Размер фланца
NNG-1,3	650	1600	360	30	DN 100

Насос изготовлен из геттерных дисков. Каждый диск имеет внешний диаметр 25 мм и толщину 1.6 мм. Пористость составляет 30%, внутренний диаметр равен 8 мм для размещения нагревателя. Химический состав неиспаряемого геттера Ti-Zr-Al. Диски установлены последовательно в колоннах с зазорами 1.5 мм. В каждой колонне их по 31 штуки. Общее

количество колонн равно 6 штук. Высота от фланца до торца геттерного насоса составляет не более 130 мм. Температура контролируется хромель-алюмелевой термопарой. Снаружи установлен один защитный экран, снижающий мощность нагревателя в два раза. Геттерный насос имеет фланцевые соединения типа “Conflat”. Изображение геттерного насоса приведено на рис. 1.

**Рис. 1.** Прототип геттерного насоса NNG-1,3.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Активационные и газопоглощающие характеристики геттерного насоса измерялись на специализированной экспериментальной установке (рис. 2). Предварительная откачка системы осуществлялась турбомолекулярной станцией, состоящей из турбомолекулярного насоса (TMP1) и безмасляного мембранного насоса (MP). Высоковакуумная откачка достигалась турбомолекулярным насосом TMP2 через вакуумный цельнометаллический клапан VR2. Типичный уровень давления турбомолекулярного насоса TMP2 составляет до  $10^{-10}$  торр. Для контроля давления напускаемого газа использовались манометр с трубкой Бурдона и емкостной датчик марки Baratron (MKS) [8].

**Рис. 2.** Упрощенная схема вакуумной установки.

Газ в систему напускался через натекатель VF и капилляр С (молекулярная проводимость по водороду составляет  $2.8 \cdot 10^{-3}$  л/с). Откачка системы напуска осуществлялась турбомолекулярным насосом TMP1 и безмасляным мембранным насосом MP через вакуумные цельнометаллические клапаны VR4 и VR5. Для предотвращения прорыва атмосферы из TMP2 и TMP1 был установлен аварийный электроклапан VR3. Измерение высокого и форвакуумного вакуума на откачной станции производилось широкодиапазонным датчиком давления FRG PKR 251 фирмы Pfeiffer, состоящим из датчика Пирани и датчика давления с холодным катодом.

Давление в системе контролировалось датчиком давления с горячим катодом IG1 типа Extractor. Парциальные давления газов измерялись с помощью квадрупольного масс-спектрометра RGA фирмы SRS (Стэнфорд, США). Датчик давления с горячим катодом IG2 был необходим для контроля расхода газа, откачиваемого турбомолекулярным насосом TMP2. Поскольку вакуумная система в плазменных установках не требует прогрева на месте, то и в нашем случае стенд не прогревался. Измерялась эффективная скорость откачки турбомолекулярного насоса  $S_{TMP2}$ , молекулярная проводимость капилляра и коэффициенты чувствительности датчиков давления с горячими катодами для каждого газа ( $H_2$  и  $D_2$ ). В табл. 2 приведены значения этих величин для каждого газа. Все вакуумметры калибровались

каждый раз после напуска воздуха до атмосферного давления. Клапан VR1 был закрыт в начале экспериментов. Затем он открывался, и инжектируемый газ начинал поступать в испытательную камеру через капилляр.

**Таблица 2.** Молекулярная проводимость капилляра, эффективная быстрота откачки турбомолекулярного насоса TMP2 и коэффициенты чувствительности датчиков давления с горячим катодом для разных газов [8]

Газ	Молекулярная проводимость $C$ , л/с	Быстрота откачки $S_{TMP2}$ , л/с	Коэффициент чувствительности, $K_{IG1}$	Коэффициент чувствительности, $K_{IG2}$
H <sub>2</sub>	$2.8 \cdot 10^{-3}$	28	2.3	2.3
D <sub>2</sub>	$2.15 \cdot 10^{-3}$	21	3.55	3.55

Поток газа в испытательную камеру можно определить как

$$Q_{total} = C (\Delta P_{bar} - \Delta P_{IG1}), \quad (1)$$

где  $C$  [л/с] – калиброванная проводимость капилляра,  $\Delta P_{bar}$  и  $\Delta P_{IG1}$  [торр] – разности давлений по емкостному манометру и датчику давления с горячим катодом соответственно,

$$\begin{aligned} \Delta P_{bar} &= P_{bar\_after} - P_{bar\_before}, \\ \Delta P_{IG1} &= P_{IG1\_after} - P_{IG1\_before}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $P_{bar\_before}$  и  $P_{bar\_after}$  [торр] – давления по емкостному датчику давления Baratron перед и после напуска газа соответственно,  $P_{IG1\_before}$  и  $P_{IG1\_after}$  [торр] – давления по датчику давления IG1 перед и после напуска газа соответственно.

Скорость откачки  $S_{NEG}$  геттера при инжекции газа можно определить, как

$$S_{NEG} = \frac{\frac{Q_{total}}{K \cdot \Delta P_{IG1}} - S_{TMP2}}{A}, \quad (3)$$

где  $S_{NEG}$  и  $S_{TMP2}$  [л/(с·см<sup>2</sup>)] – скорости откачки геттерного насоса и турбомолекулярного насоса TMP2 соответственно, которые равны 28 л/с для водорода и 24 л/с для дейтерия;  $K$  – коэффициент чувствительности,  $A$  [см<sup>2</sup>] – суммарная площадь геттера.

Чувствительность вакуумметров была измерена на другой установке заранее. Чувствительность вакуумметров – это отношение показаний истинного давления к измеренному давлению, где истинное давление – это отношение потока инжектируемого газа, деленное на скорость откачки насоса. Зная истинные показания вакуумметров и расход напускаемого газа, можно найти эффективную быстроту откачки турбомолекулярного насоса

TMP2 до активации геттера для различных газов. Сорбционная емкость определялась как число молекул, при сорбции которых быстрота откачки падает до 90% от исходного уровня:

$$\text{Doze} = \frac{\int_0^t (Q_{\text{total}} - Q_{\text{TMP2}}) dt}{m}, \quad (4)$$

где  $Q_{\text{total}}$  и  $Q_{\text{TMP2}}$  [л · торр/с] – общий поток газа и поток газа, откачиваемый турбомолекулярным насосом TMP2, соответственно,  $t$  [с] – период измерения,  $m$  [г] – масса геттера.

Поток газа, откачиваемый турбомолекулярным насосом TMP2, определяется как

$$Q_{\text{TMP2}} = S_{\text{TMP2}} K (\Delta P_{\text{IG1}} - \Delta P_{\text{IG2}}), \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{IG2}} &= P_{\text{IG2\_after}} - P_{\text{IG2\_before}} \\ \Delta P_{\text{IG1}} &= P_{\text{IG1\_after}} - P_{\text{IG1\_before}} \end{aligned} \quad (6)$$

$P_{\text{IG1\_before}}$  и  $P_{\text{IG1\_after}}$  [торр] – давления датчика давления IG1 перед и после напуска газа соответственно,  $P_{\text{IG2\_before}}$  и  $P_{\text{IG2\_after}}$  [торр] – давления датчика давления IG2 перед и после напуска газа соответственно,  $K$  – коэффициент чувствительности.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЯ

После откачки и проверки на герметичность при комнатной температуре каждый раз перед измерением геттер активировался в течение 1 ч при максимальной температуре, равной 650 °С, и пассивировался на воздухе не менее 3 ч после каждого измерения.

Для геттерного насоса при комнатной температуре были проведены измерения скорости откачки водорода, дейтерия и сорбционной емкости по водороду. Сорбционная емкость водорода и его изотопов оценивалась примерно в несколько л · торр/г. Избыточное насыщение геттера водородом приводит к разрушению и растрескиванию геттера.

На рис. 3 представлена зависимость температуры активации от мощности нагревателя [9]. Эта мощность активации приведена для вакуумной емкости диаметром 350 мм. Можно ожидать, что при меньшем диаметре мощность также будет уменьшаться, так как тепловые потери за счет излучения будут переотражаться от стенок вакуумной емкости и возвращаться на геттер. Чем меньше зазор между насосом и стенкой емкости, тем больше вероятность возврата тепла.

**Рис. 3.** Зависимость температуры активации от мощности нагревателя для геттерного насоса.

На рис. 4 показана зависимость удельной сорбционной емкости по водороду и дейтерию от количества сорбированного газа, деленного на массу геттера.

**Рис. 4.** Удельная сорбционная емкость для водорода и дейтерия как функция...

Насосы из нераспыляемого геттера являются “захватными” насосами, работа которых основана на хемосорбции газа к поверхности геттера; при данной скорости адгезии быстрота откачки зависит от скорости столкновений, которая в свою очередь зависит от среднеарифметической скорости и, следовательно, от квадратного корня из массы частицы. В принципе, химическая активность водорода и его изотопов не зависит от массы изотопа. При таких условиях скорость откачки дейтерия должна быть в 1.41 раза ниже, чем у водорода. Однако коэффициент диффузии диссоциированного атома с поверхности в объем материала зависит от его массы, и этот эффект может влиять на общую скорость откачки [10]. Другим объяснением может быть то, что даже небольшое содержание примесей гелия (менее 1%) может привести к снижению скорости откачки дейтерия в два раза. Однако любое из этих утверждений требует дополнительных экспериментальных исследований или создания обоснованной физической модели.

Поскольку поверхности геттера легко пассивируются некоторыми монослоями оксидов и карбидов при откачке, а затем химически связанные атомы кислорода, углерода и азота диффундируют с поверхности в объем геттера при активации, то в дальнейшем необходимо понять, сколько циклов активации и пассиваций при атмосферном давлении возможно провести без ухудшения газопоглощающих и активационных свойств насоса. На сегодняшний день количество активаций и пассиваций составляет более 50 раз.

Создание и исследование насоса с требуемой большой скоростью откачки (до  $10^3$  м<sup>3</sup>/с) является важным шагом в технологическом создании, разработке и исследовании крупномасштабных насосов на базе нераспыляемых геттеров для применения в инжекторах нейтрального пучка. Измерение удельной быстроты откачки и сорбционная емкость по водороду и дейтерию были экспериментально исследованы на прототипе вакуумного насоса. Экспериментальные результаты также охватывали надежность тепловых нагревателей и количество пассиваций и активаций.

Следующим шагом является создание макета насоса, состоящего из более чем двадцати подобных картриджей со скоростью откачки 1300 л/с. Эта задача поднимает вопрос о том, как расположить нагреватели, т.е. разместить нагреватель внутри каждого картриджа или нагреватели между картриджами.

Ожидается, что общая скорость откачки макета насоса будет меньше суммы всех картриджей по отдельности. Объяснение кроется в ограниченной проводимости и/или неполной активации некоторых картриджей.

## 5. ВЫВОДЫ

В работе измерены удельные скорости откачки для водорода, равные  $0.81 \text{ л}/(\text{с}\cdot\text{см}^2)$  и  $0.44 \text{ л}/(\text{с}\cdot\text{см}^2)$  для дейтерия для нераспыляемого геттера Ti-Zr-Al, а также предложена конструкция макета будущего насоса для применения в инжекторе нейтральных пучков в ИЯФ СО РАН. На основании полученных результатов данные геттеры могут быть использованы в качестве насосов с большой быстротой откачки по водороду в плазменных установках. Для получения быстроты откачки равной  $1000 \text{ м}^3/\text{с}$  по водороду необходимо обеспечить площадь геттера чуть больше  $120 \text{ м}^2$  или разместить около  $1.3 \cdot 10^5$  подобных дисков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бельченко Ю. И., Давыденко В. И., Дейчули П. П. и др. // УФН. 2018. V. 188. P. 595. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.02.038305>
2. Deichuli P., Davydenko V., Belov V. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. P. 02B114. <https://doi.org/10.1063/1.3672108>
3. Manini P., Conte A., Viale L. et al. // Vacuum. 2013. V. 94. P. 26. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2013.01.017>
4. Benvenuti C., Chiggiato P., Costa Pinto P., Prodromides A., Ruzinov V. // Vacuum. 2003. V. 71. P. 307. [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(02\)00755-8](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(02)00755-8)
5. Benvenuti C., Chiggiato P., Cicoira F., L'Aminot Y. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1998. V. 16. P. 148. <https://doi.org/10.1116/1.580963>
6. Benvenuti C. // Nucl. Instrum. Methods. 1983. V. 205. P. 391. [https://doi.org/10.1016/0167-5087\(83\)90003-0](https://doi.org/10.1016/0167-5087(83)90003-0)
7. Official website of company "Polema". <http://www.polema.net/oblasti-primenenija.html>
8. Краснов А.А., Семенов А.М. // Изв. РАН. Серия физ. 2023. V. 87. P. 648. <https://doi.org/10.31857/S0367676522701186>
9. Semenov A., Krasnov A., Idashin D. // Proc. IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). 2024. P. 820. <https://doi.org/10.1109/EDM61683.2024.10615194>
10. Sartori E., Siragusa M., Sonato P. et al. // Vacuum. 2023. V. 214. P. 112198. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112198>



## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Прототип геттерного насоса NNG-1,3.
- Рис. 2.** Упрощенная схема вакуумной установки: RGA – масс-спектрометр, IG1 и IG2 – датчик давления с горячим катодом, FRG – широкодиапазонный датчик; NEG – испытуемый геттерный насос, С – капилляр с известной молекулярной проводимостью, TMP1+MP – турбомолекулярная откачная станция, TMP2 – турбомолекулярный насос, Baratron – емкостный датчик давления, Manometer – стрелочный деформационный манометр, VF – щелевой натекагель; VR1, VR2, VR4, VR5 – цельнометаллические угловые клапаны, VR3 – аварийный электрический клапан.
- Рис. 3.** Зависимость температуры активации от мощности нагревателя для геттерного насоса.
- Рис. 4.** Удельная сорбционная емкость для водорода и дейтерия как функция поглощенного количества газа, деленного на массу геттера.



**Рис. 1.**

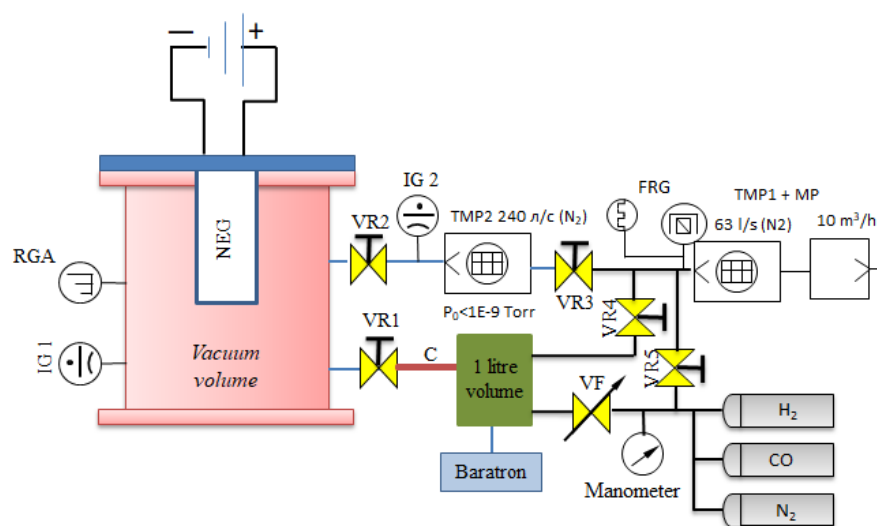


Рис. 2.

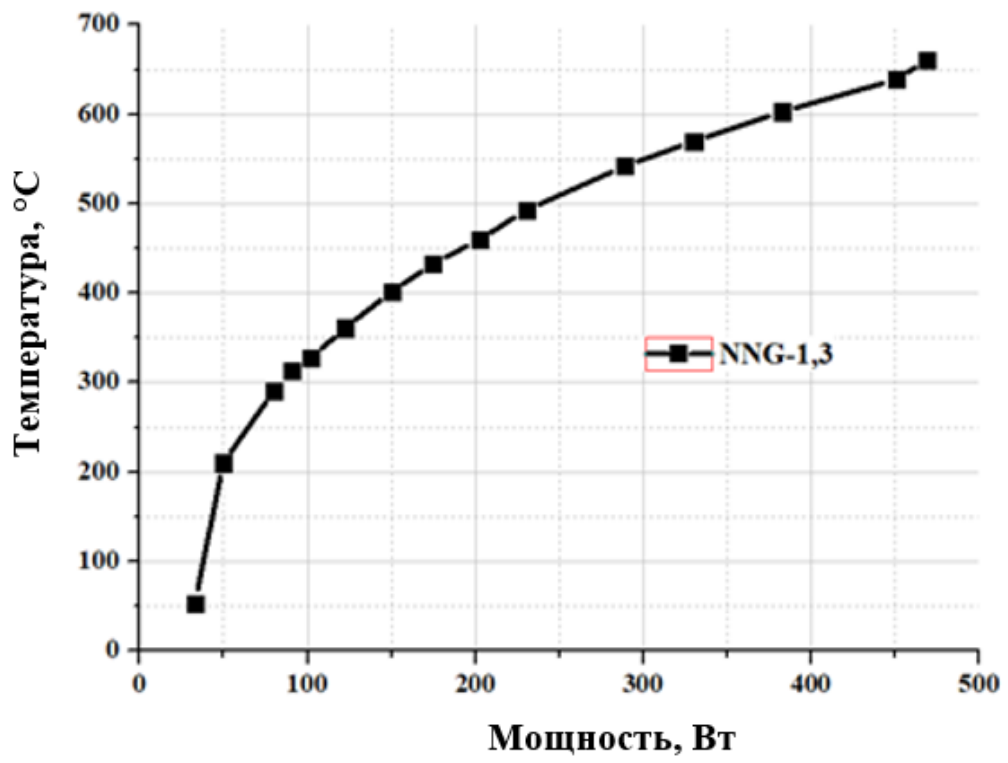


Рис. 3.

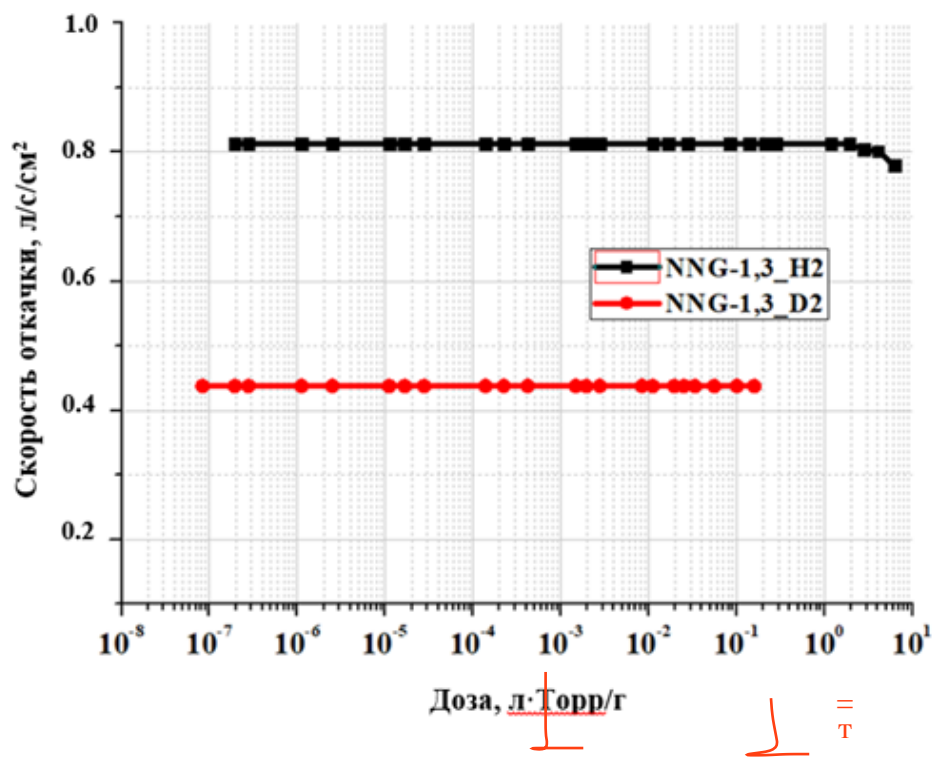


Рис. 4.