

КАЛИБРОВКА ДАВЛЕНИЯ В МИНИАТЮРНОМ ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ

Н.В. Мамедов, С.П. Масленников, А.А. Солодовников

АННОТАЦИЯ

Представлены исследования калибровки давления в миниатюрном линейном ускорителе (МЛУ) по току разряда пеннинговского ионного источника (ПИИ). Исследовались зависимости вольт-амперных характеристик ПИИ в составе МЛУ от давления газа, величины и конфигурации магнитного поля, параметров системы импульсного/стационарного электропитания. На основе полученных результатов создана и отработана методика определения давления в объеме запаянного МЛУ на основании получения амплитудных значений тока разряда в ионном источнике.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ПЕННИНГОВСКИЙ ИОННЫЙ ИСТОЧНИК, МИНИАТЮРНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ

PRESSURE CALIBRATION IN MINIATURE LINEAR ACCELERATORS

N.V. Mamedov, S.P. Maslennikov, A.A. Solodovnikov

ABSTRACT

Studies of pressure sensor calibration in a miniature linear accelerator (MLA) by the penning ion source (PIS) discharge current are presented. The voltage-ampere characteristics dependences of the PIS MLA on gas pressure, magnitude and configuration of the magnetic field and parameters of the pulsed/stationary power supply system were investigated. Based on the obtained results, the method for determining the pressure in the gas sealed MLA volume was created and tested.

KEYWORDS

MINIATURE LINEAR ACCELERATOR, PENNING ION SOURCE

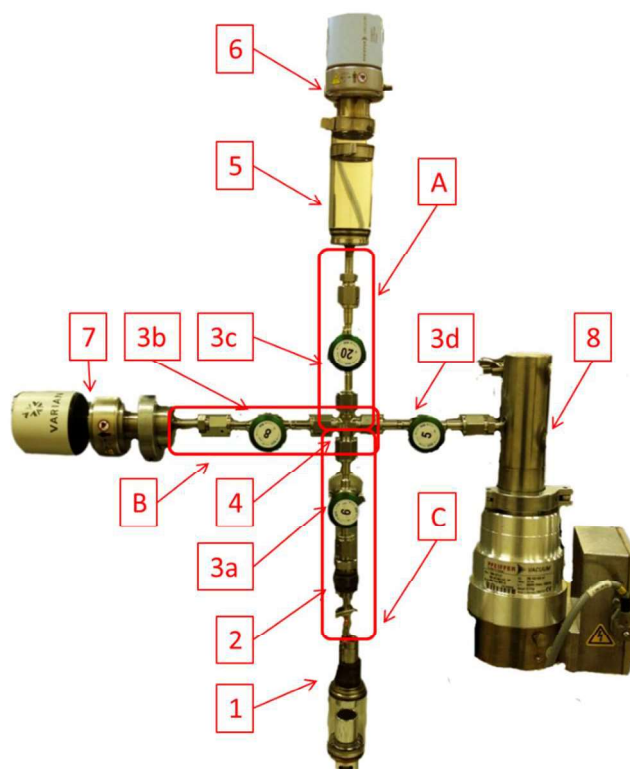
ВВЕДЕНИЕ

Миниатюрные линейные ускорители (МЛУ) широко используются в различных областях науки и техники [1,2]. МЛУ — это запаянный электровакуумный прибор, который состоит из пеннинговского ионного источника (ПИИ) [3], ионно-оптической системы (фокусирующего и ускоряющего электродов) [4] и мишени [5].

Знание реального давления внутри запаянного МЛУ необходимо для определения рабочих режимов разряда, позволяющих достичь стабильности его горения (т.е. стабильности тока разряда и вытягиваемого ионного тока). Помимо этого, калибровка величины давления по току разряда позволит оптимизировать параметры электропитания МЛУ (в частности, питание нагревателя геттера для десорбции рабочего газа). Также, знание величины давления позволит аналитически оценить степень влияния вторичных процессов взаимодействия ионного пучка с газовой средой МЛУ. Поскольку при движении к мишени ускоренного пучка ионов происходят его потери за счет упругого рассеяния, резонансной перезарядки и ионизации ионным ударом.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Опытные образцы МЛЮ подключаются к вакуумной системе диагностического комплекса, внешний вид которой представлен на рис.1, с помощью стандартных откачных штенгелей. Данная система состоит из вакуумного креста (трубный обжимной фитинг Swagelok SS-400-4), четырех клапанов (Swagelok SS-4H), двух широкодиапазонных датчиков давления Pfeiffer PKR 251 и Varian FRG-702. Откачная система состоит из турбомолекулярного насоса Pfeiffer TC600 (скорость откачки 33 л/с по азоту) и безмасляного мембранного насоса Vacuubrand MZ-2D. Также для проведения измерений был изготовлен «мерный» металлостеклянный баллон с присоединенным к нему манометром Pfeiffer PKR 251. Внутри «мерного» баллона установлен геттер ГПТ – 1 (газогенератор рабочего газа, аналогичный установленному в ПИИ МЛЮ). Рабочий газ дейтерий.



1 – МЛЮ (насыщенный D2), 2 – Стандартный откачной штенгель, 3a,b,c,d – Клапаны (вентили) Swagelok SS-4H, 4 – Крест – трубный обжимной фитинг Swagelok SS-400-4, 5 – «Мерный» объем (металлостеклянный баллон), 6 – Широкодиапазонный датчик давления Varian FRG-702, 7 – Широкодиапазонный датчик давления Pfeiffer PKR 251, 8 – Турбомолекулярный насос Pfeiffer TC600. А, В, С – соединительные вакуумные трубопроводы

Рис.1 Внешний вид диагностического стенда

Разработанная система электропитания комплекса обеспечивает возможности для проведения исследований ПИИ в режимах постоянного или импульсного тока, а также позволяет в режиме реального времени регистрировать катодный, анодный и вытягиваемый токи МЛЮ [6]. Система измерений комплекса полностью автоматизирована, для создания управляющего контура с обратной связью по давлению в программе управления реализован виртуальный пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В МЛЮ

Объем «мерного» баллона практически равен объему МЛЮ и отличия состоят лишь в соединительных элементах к вакуумной установке (А В С – на рис. 1), то найдя связь между давлением, измеряемым датчиком Varian (служит основным средством измерения), и давлением, измеряемым датчиком Pfeiffer (определяет давление в «мерном» объеме), можно в первом приближении оценить связь между давлением, измеряемым датчиком Varian, и реальным давлением внутри МЛЮ. Как известно [7], давление P в полости откачиваемого через штенгель любого электровакуумного прибора определяется как:

$$P = P_{\text{изм}} + \Delta p = P_{\text{изм}} + \frac{Q'}{U}, \quad (1)$$

где $P_{\text{изм}}$ – давление, измеряемое в вакуумной системе, Δp – перепад давления на откачном штенгеле изделия, Q' – поток газа, проходящий через откачной штенгель ($Q' = \Delta(pV)/\Delta t$), U – проводимость штенгеля.

На основании внутренних геометрических размеров всех соединительных трубопроводов (А В С – на рис. 1) рассчитаны их проводимости в предположении течения газа в молекулярном режиме. При среднем диаметре трубопровода 3 мм, для выполнения критерия Кнудсена в молекулярном режиме измеряемое давление должно быть не выше ~5 Торр. Поскольку характерных рабочих давлениях в МЛЮ (10^{-4} - 10^{-2} Торр) [8-10] критерий Кнудсена для молекулярного режима выполняется. Таким образом, при нахождении системы в квазистационарном режиме (нет существенного изменения давления за время измерений) можно воспользоваться методом «постоянного давления» для нахождения давления в МЛЮ (в «мерном» объеме) [7]. Связь давления в МЛЮ («мерном» объеме) с показаниями датчика Varian определяется оценочными выражениями [7]:

$$p_{\text{МЛЮ}} = p_{\text{varian}} \cdot (1 + U_B/U_C) = p_{\text{varian}} \cdot (1 + 0,075/0,05) = 2,5 \cdot p_{\text{varian}} \quad (2)$$

$$p_{\text{м.о.}} = p_{\text{varian}} \cdot (1 + U_B/U_C) = p_{\text{varian}} \cdot (1 + 0,075/0,075) = 2 \cdot p_{\text{varian}}, \quad (3)$$

где P_{varian} – давление, измеряемое датчиком давления, $P_{\text{МЛЮ}}$ – давление внутри МЛЮ, $P_{\text{м.о.}}$ – давление внутри «мерного» объема.

Для оценки давления в МЛЮ (в «мерном» объеме) при изменении давления воспользуемся методом «постоянного объема» [7]. Оценку величины потока из геттера произведена с помощью «метода накопления с дифференциальным анализом изменения давления». Из основного уравнения вакуумной техники для МЛЮ следует (в предположении, что за время проведения измерений, натекание и газовыделение в системе малы по сравнению с потоком из геттера) с учетом выражения (1):

$$p_{\text{МЛЮ}} = \frac{V_{\text{изм}}}{U_{\text{МЛЮ}}} \cdot \frac{dp_{\text{varian}}}{dt} + p_{\text{varian}} \quad (4)$$

$$p_{\text{м.о.}} = \frac{V_{\text{изм}}}{U_{\text{м.о.}}} \cdot \frac{dp_{\text{varian}}}{dt} + p_{\text{varian}}, \quad (5)$$

где $V_{\text{МЛЮ}}$ – объем МЛЮ, $P_{\text{МЛЮ}}$ – давление внутри МЛЮ, $p_{\text{м.о.}}$ – давление внутри «мерного» объема, $V_{\text{изм}}$ – характерный объем присоединенной вакуумной системы ($V_{\text{изм}} \approx 0,012$ л), p_{varian} – давление, измеряемое датчиком давления Varian, U_i – проводимость соответствующего трубопровода. Таким образом, по графику изменения давления (т.е. в каждый момент времени t определяется значение p_{varian} и dp_{varian}/dt) определяется давление в МЛЮ (или «мерном» объеме).

На рисунке 2 показаны зависимости, связывающие показания датчика Varian (служит основным средством измерения МЛУ) с показаниями датчика Pfeiffer (определяет давление в «мерном» объеме) при подаче и откачке рабочего газа с помощью геттера для нескольких напряжений на геттере. Показано, что величина напряжения на геттере (тока, текущего через геттер) определяет только скорость изменения давления и значение максимального достижимого давления. Из рисунка видно, что вне зависимости от напряжения на геттере связь показаний датчиков одинакова. Поэтому в первом приближении при «включенном» геттере в диапазоне давлений от 10^{-4} до 10^{-2} Торр можно оценить реальное давление внутри «мерного» объема в ≈ 2 раза выше показания датчика давления ($p_{m.o.} = p_{pfeiffer} \approx 2 \cdot p_{varian}$). Данное соотношение совпадает с формулой (3). Погрешность измерений можно оценить через формулу «переноса» ошибок, позволяющую вычислить погрешность косвенных измерений через погрешность прямых измерений $\Delta p_{МЛУ}/p_{МЛУ} = 42\% (= 30\% \cdot \sqrt{2})$ (погрешность двух датчиков по 30%).

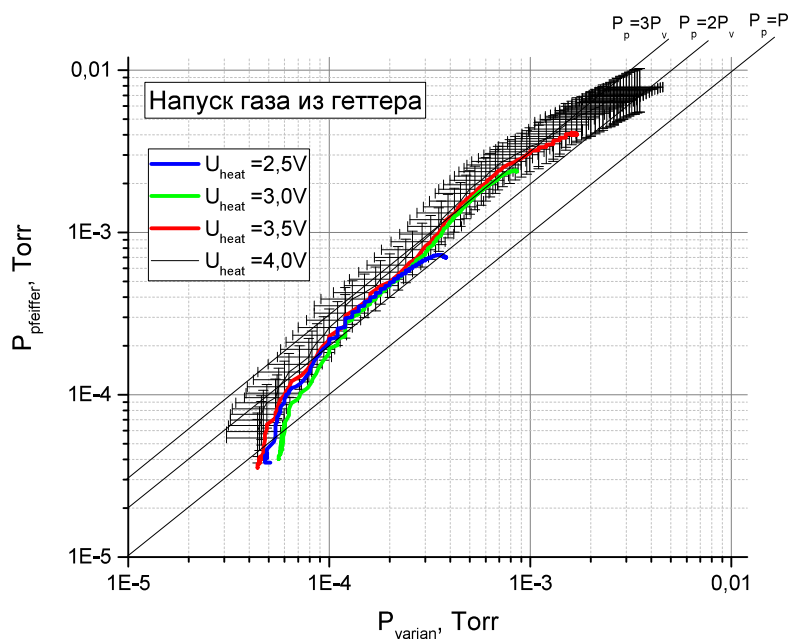


Рис. 2 Зависимости, связывающие показания датчика Varian (служит основным средством измерения давления в МЛУ) с показаниями датчика Pfeiffer (определяет давление в «мерном» объеме) при подаче рабочего газа с помощью геттера для нескольких значений напряжения на геттере

КАЛИБРОВКА ДАВЛЕНИЯ В МЛУ ПО ТОКУ РАЗРЯДА ПИИ

На рисунках 3 и 4 представлены характерные зависимости тока разряда I_d от давления в МЛУ (давление в МЛУ определялось пересчетом давления, измеряемого датчиком Varian) для различных напряжений разряда U_d от 1 до 3кВ и вытягивающем напряжении $U_{ex.} = 20кВ$. Напряжение на геттере было постоянным и держалось на уровне $U_{heat} \approx 2,8В$ (при токе, проходящем через геттер $I_{heat} \approx 170мА$). Как видно, общий характер кривых одинаков при этом видно, что $I_d (P_{МЛУ})$ не линейна. Зависимость на рисунке 3 можно условно разбить на 6 частей (соответствующих различным модам горения разряда и переходным областям [11, 12]):

- А – $P_{\text{МЛУ}} \sim 0,03 \cdot \text{мТорр}$ – область зажигания разряда, ток разряда $I_d \approx 10\text{-}30\text{мкА}$;
- В – $0,03 \cdot \text{мТорр} < P_{\text{МЛУ}} < 0,2 \text{ мТорр}$ – область линейного роста тока разряда при увеличении давления, видны флуктуации разрядного и вытягиваемого токов, ток разряда $I_d \approx 30\text{-}50\text{мкА}$;
- С – $0,15 \cdot \text{мТорр} < P_{\text{МЛУ}} < 0,7 \text{ мТорр}$ – область линейного роста тока разряда при увеличении давления, разряд при этом **стабилен**, ток разряда I_d увеличивается с 40 до 300мкА;
- D – $0,8 \text{ мТорр} < P_{\text{МЛУ}} < 2 \cdot \text{мТорр}$ – происходит понижение тока разряда I_d с $\sim 300\text{мкА}$ до $\sim 200\text{мкА}$ при увеличении;
- E – $2 \cdot \text{мТорр} < P_{\text{МЛУ}} < 6 \cdot \text{мТорр}$ – область линейного роста тока разряда при увеличении давления, ток разряда I_d с 200 до 400мкА;
- F – $6 \cdot \text{мТорр} < P_{\text{МЛУ}}$ – область экспоненциального роста тока разряда, при увеличении давления в ~ 2 раза (с 6 мТорр до 12 мТорр) тока разряда увеличивается в ~ 30 раз (с 0,4 до 12мА).

Следует обратить внимание, что при постоянных напряжениях на аноде в пределах 2,5-3,0 кВ кривая зависимости тока разряда от давления смещается в сторону уменьшения давления, при этом ток разряда находится в диапазоне 200-800мкА при давлениях ниже 1мТорр.

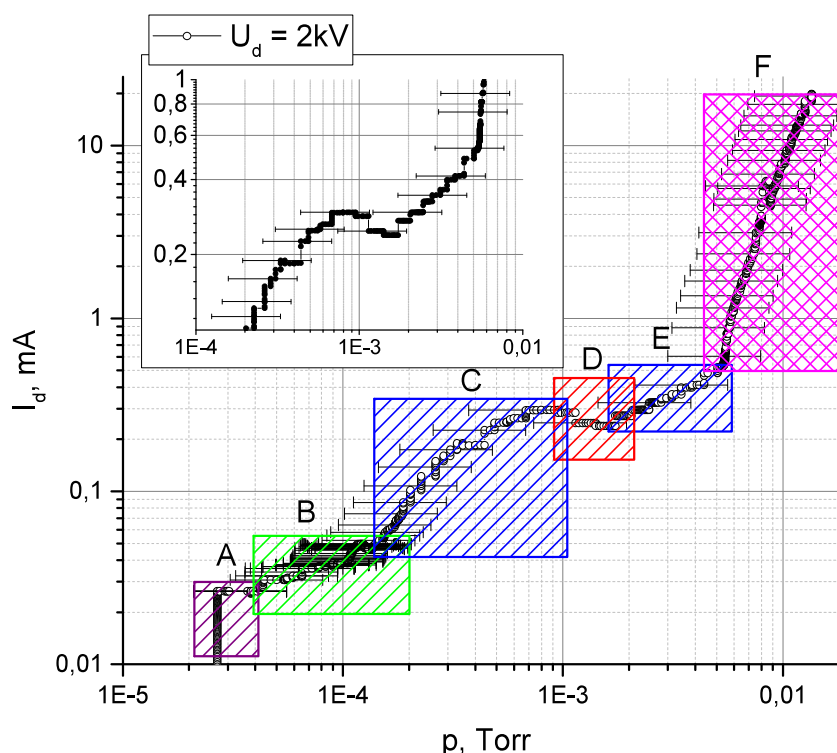


Рис. 3 Характерная зависимость тока разряда I_d от давления в ГНТ при фиксированном напряжении разряда $U_d = 2\text{кВ}$ и вытягивающем напряжении $U_{\text{ex.}} = 20\text{кВ}$ ($U_{\text{heat}} \approx 2,8\text{В}$)

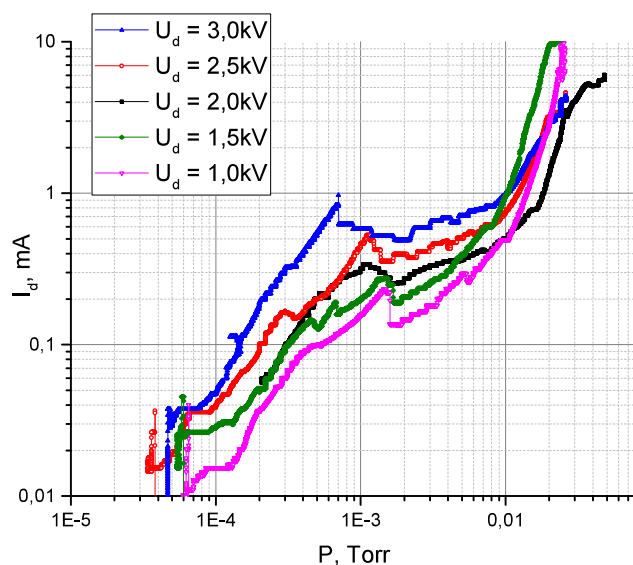


Рис. 4 Зависимости I_d ($P_{\text{МЛЮ}}$) для различных напряжений разряда U_d от 1 до 3кВ при фиксированном вытягивающем напряжении $U_{\text{ex.}}=20\text{кВ}$ (напряжение на геттере 2,7В)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Собран высоковакуумный стенд, позволяющий проводить исследования различных неотпаянных макетов МЛЮ;
2. Измерены зависимости разрядного и вытягиваемого тока от давления внутри МЛЮ при различных напряжениях разряда, напряжения на геттере;
3. Получены вольт–амперные характеристики разряда МЛЮ при работе в стационарном режиме питания, при контроле давления.
4. На основании полученных экспериментальных данных показано, что:
 - Относительная погрешность в определении давления составляет не более 45%;
 - Рабочие давления в отпаянной нейтронной трубке находятся в диапазоне $1 \cdot 10^{-3}$ - $6 \cdot 10^{-3}$ Торр;
 - Зависимость I_d ($P_{\text{МЛЮ}}$) не линейна состоит из нескольких зон, соответствующих различным модам горения разряда и переходным областям.
 - При постоянных напряжениях на аноде в пределах 2,5-3,0 кВ кривая зависимости тока разряда от давления смещается в сторону уменьшения давления, при этом ток разряда находится в диапазоне 200-800мкА при давлениях ниже 1мТорр

ЛИТЕРАТУРА

1. V. Vladivoj, 14 MeV Neutrons. Physics and Applications, CRC Press Taylor & Francis Group, New York (2016)
2. Neutron Generators for Analytical Purposes In IAEA Radiation Technology Reports No. 1. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2012. 145 pp. ISBN 978-92-0-125110-7,
3. Mamedov N.V., Gubarev A.V., et al, Plasma Sources Sci. Technol. (2020), <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab6758>

4. I.A. Kanshin // Proceeding of 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE). 978-1-7281-2685-2/20/\$31.00 2020. IEEE. doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9241976. pp. 474-478,
5. S.V. Syromukov, Atomic Energy, Vol. 128, No. 1, 2020 doi: 10.1007/s10512-020-00647-x
6. Н.В. Мамедов и др. ЖТФ, 2019, том 89, вып. 9 стр.1367-1374 doi 10.21883/JTF.2019.09.48062.34-19
7. Пипко А.И., Плисковский В.Я., Пенчко Е.А. / Конструирование и расчет вакуумных систем/ Москва, Энергия, 1979, 504стр.
8. В.Г. Марков и др. / Успехи прикладной физики -2013 - том 1, № 1 - С. 23-29
9. W. Liu, et al, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 768 (2014) 120–123, doi: 10.1016/j.nima.2014.09.052
10. B.K. Das, et al, AIP Conf. Proc. 1349, 447-448 (2011); doi: 10.1063/1.3605926
11. Schuurman W. // Physica. 1967. Vol. 36. P. 136–160.
12. Н.В. Мамедов и др. ЖТФ, 2018, том 88, вып. 8 стр.1164-1171 doi 10.21883/JTF.2018.08.46304.2396

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Н.В. Мамедов – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. ДУХОВА» (ВНИИА), г. Москва

С.П. Масленников – доктор технических наук, главный специалист ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. ДУХОВА» (ВНИИА), г. Москва; МИФИ, г. Москва.

А.А. Солодовников – инженер ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. ДУХОВА» (ВНИИА), г. Москва; МФТИ, г. Москва.