

М.Л. Виноградов
(СПбГЭТУ "ЛЭТИ"; e-mail: utilitor@mail.ru)

ВЫСОКОВАКУУМНЫЙ ДЕТЕКТОР ПОТОКА ГЕЛИЯ ДЛЯ ТЕЧЕЙСКАТЕЛЯ

Для использования в качестве детектора гелия в портативном гелиевом течеискателе автор анализирует магниторазрядный насос. Приведены результаты расчётов оптимальной магнитной индукции, обеспечение которой ведёт к увеличению чувствительности течеискателя. Материалы могут быть полезны при решении проблем техносферной безопасности.

Ключевые слова: течеискатель, магниторазрядный насос, детектор гелия.

M.L. Vinogradov **HIGH VACUUM HELIUM FLOW DETECTOR FOR LEAK CHECKER**

Author offers special design ion pump to use as a detector in a portable helium leak checker. The calculation results of the optimal magnetic induction, the ensuring of which leads to an increase in the sensitivity of the leak detector are given. The material can be helpful in solving the problems of technosphere safety.

Key words: leak detector, ion pumps, helium detector.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 23 сентября 2013 г.

Введение

Для осуществления контроля герметичности и локализации мест утечек конструкций, допускающих заполнение контрольным газом, в настоящий момент используют масс-спектрометрические течеискатели. Преимуществами данных течеискателей являются высокая чувствительность и использование для измерений безопасного, экологичного газа – гелия, недостатками – высокая стоимость, большие габариты и высокое энергопотребление.

Контроль герметичности крупных объектов, таких как трубопроводы, элементы корпуса космического корабля, контуры циркуляции АЭС, эффективнее осуществлять с помощью малогабаритного гелиевого течеискателя. Данный течеискатель построен на базе селективного сенсора, пропускающего из смеси газов преимущественно атомы гелия, и высоковакуумного детектора гелия. Принцип работы прибора подробно описан в [1].

После рассмотрения различных видов высоковакуумных датчиков, для выполнения функции детектора гелия в течеискателе выбран магниторазрядный насос, благодаря наличию у него линейной зависимости разрядного тока от концентрации газа в области низких давлений и способности откачивать гелий.

К магниторазрядному насосу, используемому в качестве метрологического элемента, предъявляются следующие требования:

- максимальная скорость изменения тока при изменении давления, которое имеет место при диффузии гелия через кварцевый сенсор;
- отсутствие неконтролируемых флуктуаций тока;
- минимальное возможное предельное разряжение;
- отсутствие насыщения гелием в течение срока эксплуатации;
- малая масса и габариты, главным образом, облегченная магнитная система.

Средний ток малогабаритного магниторазрядного насоса при низких давлениях составляет десятки наноампер, напряжение – единицы киловольт. Оценка энергопотребления магниторазрядного насоса и сравнение с затратами энергии в течеискателе по другим каналам позволяет сделать вывод об отсутствии необходимости предъявления требований к снижению среднего значения разрядного тока детектора.

Задачей проведенного автором исследования является изучение характеристик малогабаритного магниторазрядного насоса с точки зрения его применения в качестве высоковакуумного детектора гелия для течеискателя. Далее в материале статьи будем считать термины "магниторазрядный насос" и "высоковакуумный детектор" гелия идентичными и обозначающими один объект.

Исследование зависимости флуктуаций тока высоковакуумного детектора гелия от давления

Пороговая чувствительность течеискателя – это минимальный достоверно регистрируемый поток гелия, вызываемый которым сигнал различим на фоне флуктуаций тока детектора. Таким образом, важной характеристикой магниторазрядного насоса, применяемого в качестве детектора гелия, является величина флуктуаций разрядного тока.

При проведении экспериментального изучения временной зависимости разрядного тока детектора с установленным кварцевым сенсором для совокупности измерений с различными детекторами и сенсорами отмечены следующие общие особенности:

1. Вследствие нарушения баланса гелия, поступающего через сенсор, откачиваемого магниторазрядным насосом и высвобождаемого с его внутренней поверхности, в процессе работы может наблюдаться плавное изменение среднего значения тока детектора. Данный эффект не влияет на качество распознавания сигнала течи, не несет информативной нагрузки и может быть отфильтрован программными методами.

2. Отсутствие зависимости амплитуды флуктуаций сигнала от абсолютного значения тока при низких давлениях. Колебания тока детектора остаются постоянными при разных значениях тока и лежат в диапазоне от 0 до 15 *нА*.

Исследования проводились при давлениях ниже 10^{-5} *Па* внутри высоковакуумного детектора гелия, ток разряда изменялся от 0 до 30 *мкА*. Указанные условия соблюдаются в процессе работы магниторазрядного течеискателя и не нарушаются при поступлении порции гелия вследствие диффузии через сенсор.

На рис. 1 представлены графики временных зависимостей среднего значения разрядного тока и амплитуды флуктуаций сигнала детектора.

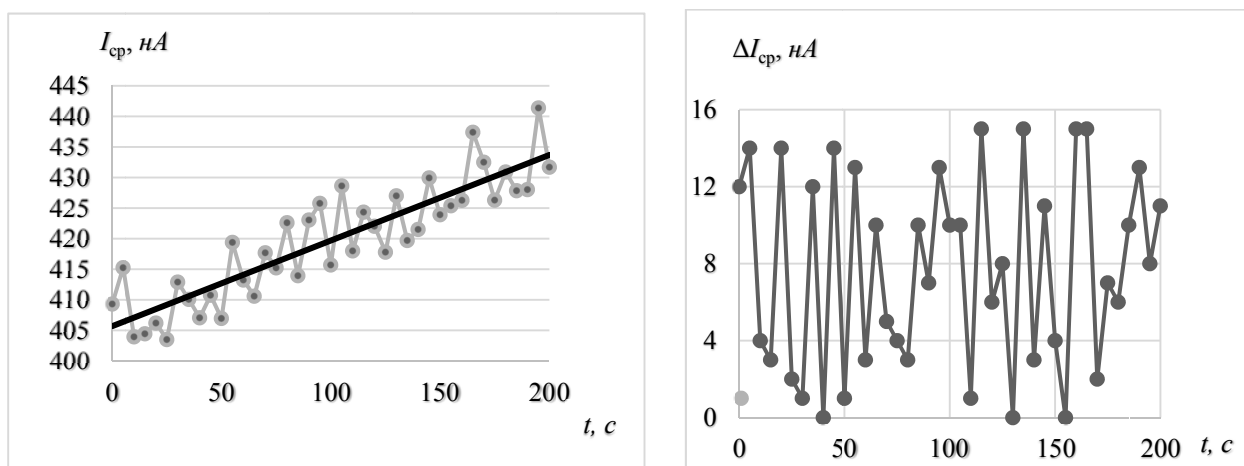


Рис. 1. Временные зависимости среднего значения разрядного тока (слева) и амплитуды флуктуаций сигнала (справа) детектора

При работе детектора имеют место колебания различных видов. Быстрые флуктуации тока детектора, длительность и амплитуда которых подобна полезному сигналу, и медленные колебания, связанные с процессами термо- и газодинамического равновесия в системе. Переходный процесс стабилизации среднего значения тока не влияет на чувствительность детектора, так как не затрудняет распознавание сигнала течи.

Обнаруженные особенности позволяют сделать вывод о том, что для повышения чувствительности прибора не требуется снижение среднего уровня разрядного тока. Повышение давления при эксплуатации и хранении течеискателя не приведет к ухудшению способности к регистрации потока гелия, соответствующего пороговой чувствительности.

Моделирование характеристик высоковакуумного детектора гелия

При математическом моделировании характеристик высоковакуумного детектора гелия применялся подход, подобный описанному в [2]. В качестве основы для точного количественного описания процессов, происходящих в ячейке Пеннинга, использована теория спокойного разряда [3]. Плазма разряда Пеннинга характеризуется ярко выраженными неустойчивостями, однако в области сильных магнитных полей при низком давлении, вследствие уменьшения пространственного заряда, имеет место устойчивый (спокойный) разряд. Явления, происходящие при данных условиях, могут быть описаны в приближении магнитной гидродинамики.

Новизна заключается в том, что расчёты модифицированы под магнито-разрядный насос, главной функцией которого является не откачивающее действие, а измерение давления. В процессе измерения в камеру детектора попадает преимущественного гелий. Поэтому модель адаптирована к изучению сигнала от этого газа, а не от азота, как в классических расчётах.

Ниже представлена зависимость разрядного тока от давления в камере насоса:

$$I(p) = \frac{3\pi\epsilon_0 e}{16m_e} \cdot \left(\frac{v_i}{v_c}\right)^2 \cdot \alpha \cdot p \cdot B^2 \cdot d^2 \cdot l \cdot N, \quad (1)$$

где ϵ_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды;

e – заряд электрона;

m_e – масса электрона;

N – число ячеек;

v_i – частота ионизации;

v_c – полная частота соударений;

α – переменная, характеризующая род газа;

p – давление;

B – магнитная индукция;

d – диаметр ячейки;

l – длина ячейки;

N – число ячеек.

Формула (1) содержит отношение частоты ионизации v_i к полной частоте соударений v_c . Величина v_i , как и величина v_c , пропорциональна давлению. В рамках теории спокойного разряда отношение v_i/v_c принимается постоянным и, по результатам экспериментальных исследований, опубликованных в [2], равным 0,13.

Скорость изменения тока при изменении давления, которое имеет место при диффузии гелия через кварцевый сенсор, может быть определена дифференцированием выражения (1) по давлению:

$$\frac{I(p)}{dp} = \frac{3\pi\epsilon_0 e}{16m_e} \cdot \left(\frac{v_i}{v_c}\right)^2 \cdot \alpha \cdot B^2 \cdot d^2 \cdot l \cdot N. \quad (2)$$

Таким образом, величина приращения тока сигнала с изменением давления пропорциональна квадратам магнитной индукции и диаметра ячейки. Согласно требованиям к высоковакуумному детектору гелия, описанным во введении к данной статье, необходимо повышение значения $B \cdot d$.

Произведение $B \cdot d$ имеет определённое оптимальное значение, превышение которого вызывает изменение типа разряда, сопровождающееся значительным увеличением неконтролируемых флуктуаций.

При фиксированном диаметре ячейки d , расчёт предельного значения магнитной индукции, при которой разряд остаётся "спокойным", выполняется в рамках модели по соотношению (3).

$$B_{\text{онм}} = \frac{8}{\sqrt{3} \cdot d} \cdot \sqrt{\frac{m_e \cdot U_a}{e \cdot \frac{v_i}{v_c}}}, \quad (3)$$

где U_a – анодное напряжение.

Минимальное значение магнитной индукции, при которой будет поддерживаться разряд, определяется соотношением (4).

$$B_{\text{мин}} = \frac{16}{3 \frac{v_i}{v_c} \cdot d} \cdot \sqrt{\frac{2m_e U_i}{e}}, \quad (4)$$

где отношение U_i – потенциал ионизации откачиваемого газа.

Количественная оценка скорости откачки S в л/с может быть осуществлена на основе выражения (1) и эмпирического соотношения $S = 0,07 I/p$, полученного при анализе характеристик совокупности серийных магниторазрядных насосов [4].

$$S \cong 0,07 \cdot \frac{3\pi\epsilon_0 e}{16m_e} \cdot \left(\frac{v_i}{v_c}\right)^2 \cdot \alpha \cdot B^2 \cdot d^2 \cdot l \cdot N, \quad (5)$$

Формулы (1)-(5) предназначены для прогнозирования основных характеристик высоковакуумного детектора гелия на этапе проектирования. Он также может быть использован для сопоставления характеристик магниторазрядных насосов различных конструкций и выбора оптимальной конструкции насоса для применения в качестве детектора гелия в течеискателе.

Апробация расчётной модели

Конструкция и геометрия диодного магниторазрядного насоса, подготовленного для экспериментальных исследований, выбраны на основе анализа патентной информации, рынка существующих магниторазрядных насосов и исследований, представленных в материале [1]. Эскиз насоса с кварцевым сенсором приведен на рис. 2.

Геометрия насоса следующая: длина ячейки $l = 14,5$ мм, её диаметр $d = 10$ мм, количество ячеек $N = 10$. Основным газом, который будет откачиваться высоковакуумным детектором, является гелий. Потенциал ионизации гелия составляет 24,47 эВ. Минимальное значение магнитной индукции для такой конструкции, согласно соотношению (4), равно 68 мТл.

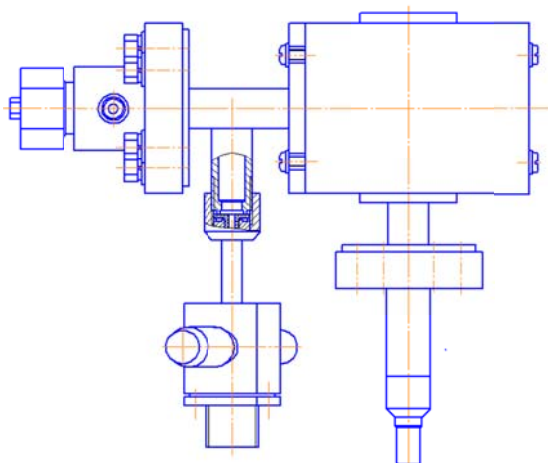


Рис. 2. Конструкция малогабаритного высоковакуумного детектора гелия с селективным сенсором

Оптимальное значение магнитной индукции определяется по выражению (3). Зависимость оптимального значения магнитной индукции от анодного напряжения и величина минимальной магнитной индукции, при которой возможно существование разряда, приведены на рис. 3. При данной геометрии ячейки для напряжения 6 кВ значение B_{opt} составляет 235 мТл .

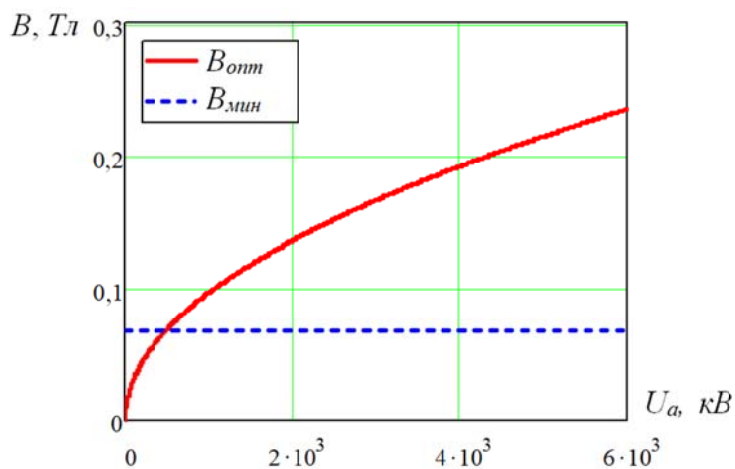


Рис. 3. Зависимость оптимальной и минимальной магнитной индукции детектора от анодного напряжения

Построение зависимости величины разрядного тока от давления было проведено при различных значениях магнитной индукции. Подстановка в формулу (1) параметров, характерных для откачки гелия, численные значения которых приведены в [5], позволяет построить зависимость тока высоковакуумного детектора гелия от давления при различных величинах анодного напряжения. На рис. 4 приведена зависимость разрядного тока от давления в детекторе. В качестве параметра выбрано значение анодного напряжения, которое определяет оптимальную величину магнитной индукции.

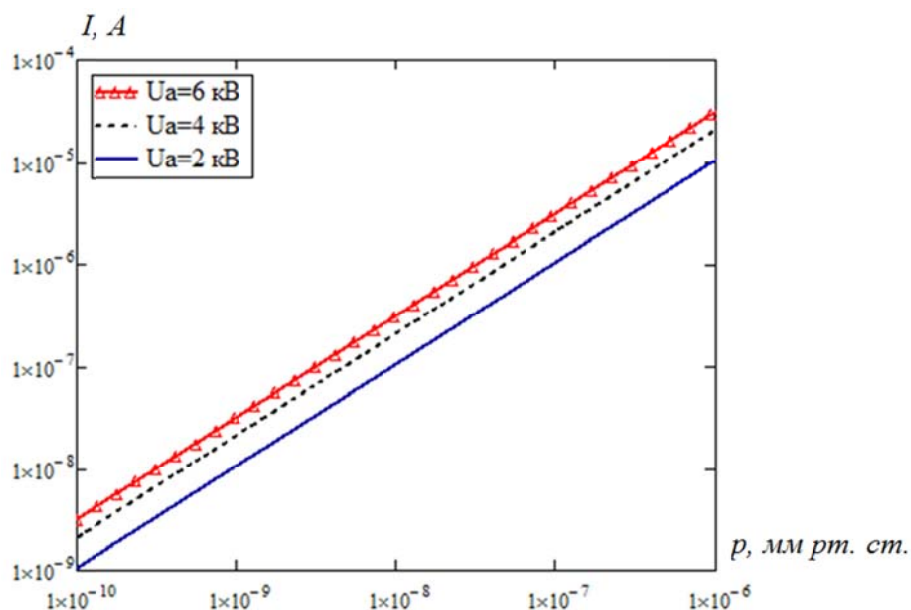


Рис. 4. Зависимость величины разрядного тока детектора от давления при различном анодном напряжении

При анализе зависимости, представленной на рис. 4, видно, что при увеличении анодного напряжения возрастает коэффициент, связывающий разрядный ток детектора и давление, характеризующий скорость изменения тока при изменении давления, которое имеет место при диффузии гелия через кварцевый сенсор. В детекторе данной геометрии максимальная чувствительность к изменению давления гелия (2), измеряемая в $A/mm\text{ рт. ст.}$, определяется численным соотношением (6):

$$\frac{I(p)}{dp} \cong 5,2 \cdot 10^{-3} \cdot U_a. \quad (6)$$

Количественная оценка скорости откачки в $л/с$ при соблюдении оптимального значения магнитной индукции оценивается выражением (7):

$$S \cong 3,7 \cdot 10^{-3} \cdot U_a. \quad (7)$$

Разработанный математический аппарат позволил определить значение оптимальной магнитной индукции и рассчитать основные характеристики высоковакуумного детектора гелия при обеспечении данного значения магнитной индукции.

Для изучения влияния величины магнитного поля на работу детектора гелия проведен эксперимент. В конструкции малогабаритного высоковакуумного детектора гелия с селективным сенсором предусмотрена возможность установки магнитной системы, создающей в ячейках насоса магнитную индукцию, равную оптимальной B_{opt} и значительно меньшую оптимальной $B_{opt}/2$, но превышающую минимальное значение, определяемое соотношением (4). Изучение работы детектора при магнитной индукции выше оптимальной не проводится, так как это противоречит принципу миниатюризации магнитной системы, важному в портативном приборе. Характеристики сенсора гелия и системы доставки газа к селективному элементу опубликованы в [4].

Высоковакуумный детектор гелия в портативном гелиевом течеискателе работает в двух режимах. В режиме "холостой ход" магнитоэлектрический насос не нагружен, отключен нагреватель сенсора течеискателя. В камеру детектора не попадают газы из атмосферы. Магнитоэлектрический насос поддерживает высокий вакуум в камере. Идеальным является условие полного отсутствия натекания. Фоновый ток в таком режиме и его колебания будут минимальными.

В "рабочем режиме" сенсор течеискателя нагрет и способен пропускать в камеру насоса атомы гелия, а также относительно малое количество других газов. В результате образуется непрерывное натекание газов в камеру детектора.

Ниже приводятся полученные в эксперименте зависимости тока магнитоэлектрического насоса с кварцевым сенсором в различных режимах работы и при значениях индукции магнитного поля B_{onm} и $B_{onm}/2$.

На рис. 5 приведена временная зависимость анодного тока. Ток детектора при индукции $B_{onm}/2$ имеет значительные колебания как в рабочем режиме, так и режиме *XX (холостого хода)*, что ухудшает чувствительность прибора и возможны ложные срабатывания.

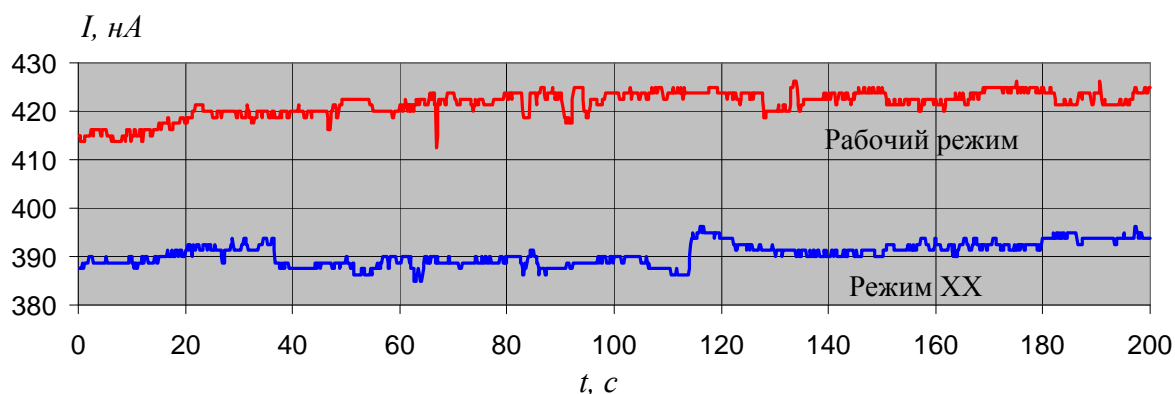


Рис. 5. Временная зависимость анодного тока при индукции $B_{onm}/2$

Как видно из рис. 6, ток детектора при индукции B_{onm} имеет незначительные колебания в рабочем режиме, что соответствует требованиям к насосу для обеспечения наилучшей пороговой чувствительности.

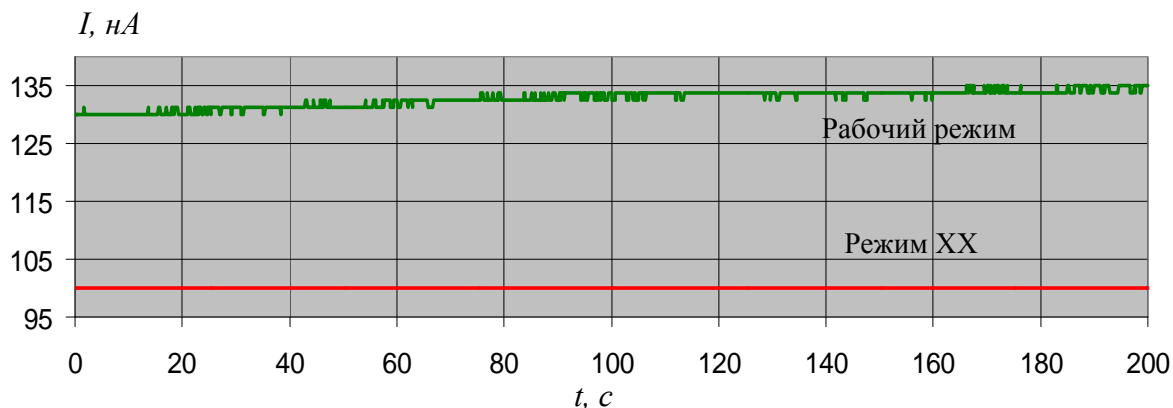


Рис. 6. Временная зависимость анодного тока при индукции B_{onm}

Экспериментальные исследования позволили установить, что в условиях, когда ячейки Пеннинга магниторазрядного насоса находятся в магнитном поле с индукцией, близкой к оптимальной, полученной в математической модели, построенной на основе теории "спокойного разряда", имеет место снижение флуктуаций разрядного тока.

На рис. 7 показана временная зависимость сигнала течи, полученная с электрометрического усилителя, при подаче к сборке сенсора и высоковакуумного детектора потока гелия $1 \cdot 10^{-7} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ при оптимальной индукции магнитной системы. Поток от течи подается к детектору на время три секунды. Такой подход к измерению чувствительности является наиболее близким к реальным условиям работы высоковакуумного детектора гелия.

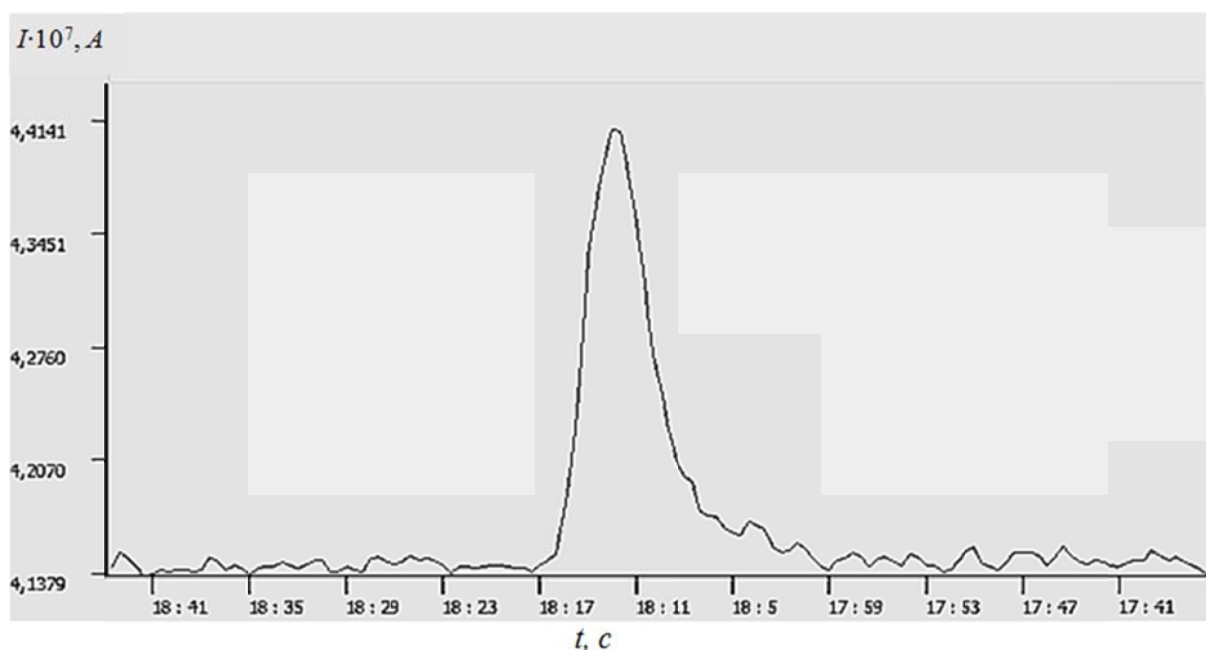


Рис. 7. Временная зависимость сигнала при приложении течи потоком $1 \cdot 10^{-7} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ на время 3 с

Сигнал хорошо различим на уровне флуктуаций фона, составляющих единицы наноампер, и превышает его флуктуации на порядок. Чувствительность к течи потоком $1 \cdot 10^{-7} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$, полученная в экспериментальных исследованиях, в пять раз превышает чувствительность зарубежных течеискателей с аналогичным принципом работы.

Программные алгоритмы обработки сигнала, поступающего с магниторазрядного насоса течеискателя, позволяют обеспечить регистрацию пика от гелия с соотношением сигнал-шум, равным двум, что позволяет прогнозировать итоговый минимальный достоверно регистрируемый течеискателем поток гелия порядка $5 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$.

Заключение

Гибридный подход к изучению особенностей применения магниторазрядного насоса в качестве высоковакуумного детектора гелия в портативном течеискателе, состоящий из расчётов в приближении магнитной гидродинамики в рамках теории "спокойного" разряда и экспериментальных исследований, позволяет осуществлять прогнозирование основных характеристик высоковакуумного детектора гелия на этапе проектирования и опытного образца.

Результаты расчётов могут быть использованы для сравнения магниторазрядных насосов различных конструкций с целью определения наиболее подходящей конструкции насоса для применения в качестве детектора гелия в течеискателе.

Новизна применяемых методов заключается в том, что расчёты модифицированы под магниторазрядный насос, главной функцией которого является не откачивающее действие, а измерение давления. В процессе измерения в камере детектора попадает преимущественно гелий. Поэтому модель адаптирована к изучению сигнала от этого газа, а не от азота, как в классических расчётах.

При проведении экспериментального изучения временной зависимости разрядного тока высоковакуумного детектора с установленным кварцевым сенсором выявлено, что амплитуда флуктуаций разрядного тока высоковакуумного детектора гелия не зависит от абсолютного значения тока при низких давлениях. Поэтому для повышения чувствительности прибора не требуется снижение среднего уровня разрядного тока. Повышение давления при эксплуатации и хранении течеискателя не приведет к ухудшению способности к регистрации потока гелия, соответствующего пороговой чувствительности.

При обеспечении оптимального значения магнитной индукции, полученного в ходе расчётов, удалось значительно снизить флуктуации анодного тока и исключить резкие броски тока, по сравнению с применением неоптимизированной магнитной системы. Снижение флуктуаций фонового тока позволило улучшить распознавание сигнала, вызываемого приращением давления гелия внутри магниторазрядного насоса. Данные, полученные в результате экспериментов, позволили добиться улучшения пороговой чувствительности переносного течеискателя до $5 \cdot 10^{-8}$ Па·м³/с, что превосходит результаты зарубежных производителей течеискателей.

Литература

1. **Виноградов М.Л.** Разработка портативного прибора контроля герметичности вакуумных систем // Технологии техносферной безопасности: интернет-журнал. Вып. 3 (49). 6 с.
2. **Васильев Г.А.** Магниторазрядные насосы. М.: Энергия, 1970. 112 с.
3. **Schuurman W.** Investigation of a low pressure penning discharge // Physica, Vol. 36, Issue 1, 1967, Pp. 136-160.
4. **Bachler W.** Optimale Ausnutzung des Magnetfeldes bei Ionen-Zerstauber-pumpen. Trans. 3rd Int. Vacuum Congress (Pergamon Press, Oxford), 1965. Pp. 609.
5. **Левитский С.М.** Сборник задач и расчётов по физической электронике: учеб. пос. для вузов. Киев: Изд-во Киевского университета, 1964. 209 с.
6. **Барченко В.Т., Виноградов М.Л.** Исследование и моделирование сенсора гелия для портативного гелиевого течеискателя // Вестник Полоцкого государственного университета. Физика, серия С, т. 1, 2013. С. 50-59.