

## ФИЗИКА

УДК 533.599.2

### ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕНСОРА ГЕЛИЯ ДЛЯ ПОРТАТИВНОГО ТЕЧЕЙСКАТЕЛЯ

канд. техн. наук, доц. **В.Т. БАРЧЕНКО, М.Л. ВИНОГРАДОВ**  
(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»)

*Применение сенсоров из кварцевого стекла позволяет сделать гелиевый течеискатель портативным. Исполнение селективирующего элемента в форме капилляра обеспечивает эффективный процесс отбора гелия из смеси газов для последующего детектирования. Представлены экспериментальные и теоретические исследования сенсора для выделения гелия из смеси газов с целью разработки первого отечественного гелиевого течеискателя, способного регистрировать поток гелия до  $1 \cdot 10^{-7}$  Па·м<sup>3</sup>/с. Показаны особенности технологии изготовления и контроля параметров кварцевого сенсора.*

Тестирование объекта на герметичность позволяет удостовериться в непроницаемости для газов, отсутствии дефектов и в его способности быть откаченным до высокого вакуума. В процессе испытаний изделий на герметичность используют пробные, индикаторные и балластные вещества. Пробным называют вещество, проникновение которого через течь обнаруживается при течеискании. В качестве пробных применяют, как правило, инертные газы, имеющие низкое содержание в атмосфере и не взаимодействующие с материалом объекта контроля или веществом внутри него. Применение гелия в течеискании позволяет осуществлять контроль герметичности с наибольшей чувствительностью благодаря малым размерам атома данного газа. Помимо этого, гелий – безопасный газ для оператора и для экологии в целом.

Широкое применение нашли масс-спектрометрические течеискатели. Регистрация наличия гелия в масс-спектрометрических течеискателях основана на процессе ионизации и сепарации гелия при движении его иона в электромагнитном поле. Высокий вакуум, необходимый для работы таких течеискателей, создается комбинацией форвакуумного и турбомолекулярного насосов. Масс-спектрометрические течеискатели характеризуются высокой чувствительностью и изготавливаются, как правило, в настольном исполнении.

В большинстве отраслей контроль герметичности осуществляется по IV классу ПНАЭ Г-7-019-89 (натекание  $6,6 \cdot 10^{-7} \dots 6,6 \cdot 10^{-6}$  Па·м<sup>3</sup>/с) и ниже [1]. Прибор для поиска течей гелия такого потока можно создать на базе магниторазрядного насоса, выполняющего функцию детектора гелия, и селективного сенсора. Принцип работы сенсора основан на высокой пропускной способности нагретого кварцевого стекла для гелия и относительно низкой для других газов.

Были проведены экспериментальные и теоретические исследования сенсора для выделения гелия из смеси газов с целью разработки первого отечественного портативного гелиевого течеискателя, способного регистрировать поток гелия до  $1 \cdot 10^{-7}$  Па·м<sup>3</sup>/с.

Портативный течеискатель будет применяться для поиска мест нарушения герметичности оболочек кабелей связи, трубопроводов и иных объектов. Места нарушения герметичности обнаруживаются с помощью прибора по ореолам рассеяния гелия, специально вводимого в состав газового наполнения проверяемых объектов и вытекающего наружу через поврежденные участки их оболочек. Прибор будет снабжен автономными источниками электропитания и может быть использован как в закрытых помещениях, так и на открытом воздухе.

Сенсором гелиевого течеискателя является первичный чувствительный элемент, функция которого состоит в сепарации атомов гелия из потока газа для последующей регистрации наличия гелия, выступающего в роли контрольного газа.

В результате проведенного анализа достижений в области разработки сенсоров для гелия установлено, что на мировом рынке серийно выпускаемых образцов данных сенсоров не существует, поэтому создание и изучение характеристик сенсоров для гелиевых течеискателей представляется актуальной задачей.

**Выбор материала.** Из множества органических и неорганических веществ на основании научных данных по газопроницаемости выделены следующие материалы: политетрафторэтилен, полипропилен, полиэтилентерефталат и кварцевое стекло.

При комнатной температуре диффузия гелия через кварцевое стекло на два порядка менее интенсивна, чем через полимерные мембраны. С помощью гелиевого масс-спектрометрического течеискателя

получены таблицы характеристик газопроницаемости материалов в зависимости от температуры. Селективность разделения гелия от других газов у полимеров оказалась недостаточной для использования в качестве сенсора гелиевого течейскаателя, так как они пропускают большое количество атомов кислорода и азота, что недопустимо для долговременной работы прибора [2].

Материалом для изготовления проницаемого для гелия сенсора выбрано кварцевое стекло. Установлено, что марка кварцевого стекла не оказывает существенного влияния на газопроницаемость. Для снижения удельной мощности, необходимой для нагрева сенсора, выбрано кварцевое стекло с минимальной прозрачностью в области инфракрасного излучения.

**Выбор конструкции сенсора.** Предел прочности кварцевого стекла при изгибе при 293 К составляет не менее 39,2 МПа, а при сжатии – 588,6 МПа. Поэтому сенсор изготавливается в форме капилляра. Такая форма обеспечивает большую по сравнению с мембраной устойчивость к перепаду давления. Рассмотрим соотношение для внешнего критического давления, приложенного к сенсору на основе кварцевого капилляра. С внутренней стороны капилляра магниторазрядный насос поддерживает давление порядка  $10^{-7}$  Па, соответствующее высокому вакууму. С внешней стороны сенсора – атмосферное давление. Таким образом, кварцевый капилляр в процессе эксплуатации должен выдерживать перепад давления не менее чем в одну атмосферу. Так как мембранный насос может создавать в области сенсора дополнительное давление, примем коэффициент запаса по перепаду давления равным двум.

Длину капилляра будем считать настолько большой, что характер закрепления ее торцов не влияет на поведение оболочки при потере устойчивости. Такая длинная оболочка может деформироваться без удлинений и сдвигов срединной поверхности; в частности, каждое сечение оболочки может деформироваться одинаково, как нерастяжимое кольцо. Поэтому для определения критического внешнего давления и формы потери устойчивости такой оболочки можно воспользоваться решением задачи устойчивости кругового кольца под действием равномерной статической нагрузки. В результате получим соотношение минимальной толщины стенки  $h_{\min}$  с радиусом капилляра  $R$ :

$$h_{\min} = R \sqrt[3]{\frac{4P}{E} (1 - \mu^2)}, \quad (1)$$

где  $P$  – давление с внешней стороны сенсора. Для кварцевого стекла модуль Юнга  $E = 7300 \cdot 10^7$  Па; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,17$ . При подстановке численных значений соотношение (1) принимает вид

$$h_{\min} = 0,022R.$$

Для капилляра радиусом  $R = 1 \cdot 10^{-3}$  мм минимальная толщина стенки составляет 22 мкм.

При экспериментальном изучении минимальной толщины кварцевого капилляра в процессе травления плавиковая кислота разрушила стенку капилляра в месте концентрации дефектов (пузырьков в кварцевом стекле). Толщина стенки, на которой произошло разрушение, была определена на оптическом микроскопе. Получено значение 16...21 мкм, что согласуется с теоретическими расчетами.

В процессе разработки сенсора решена тепловая задача нагрева кварцевого капилляра. Температура кварцевого капилляра изменяется с помощью спирали нагревателя, которая расположена на сенсоре. Для уменьшения расходуемой мощности используется отражающий тепловой экран. При нагреве от комнатной до рабочей температуры (500 °С) пропускная способность сенсора для атомов гелия резко возрастает. При этом диффузия более тяжелых атомов остается на достаточно низком для эффективной сепарации гелия уровне. Моделирование элементов узла сенсора проводится методом конечных элементов с помощью программного обеспечения ANSYS.

Результаты моделирования подтверждены экспериментальными исследованиями. Установлено, что для обеспечения рабочей температуры (500 °С) сенсора необходимо расходовать мощность 10 Вт/см<sup>2</sup> активной площади сенсора при толщине стенки порядка 100 мкм.

Изучены особенности герметизации материалов с существенно различными коэффициентами теплового расширения для решения задачи закрепления сенсора течейскаателя в металлической шайбе, которая требуется для присоединения кварцевого капилляра к детектору атомов гелия. Моделирование тепловых процессов позволило установить, что на расстоянии 15 мм от спирали, имеющей температуру 500 °С, кварцевый капилляр нагревается не выше 45 °С, что облегчает решение задачи герметизации. Изготовление сенсора выполнено с применением вакуум-плотного клея К-400, который представляет собой композицию на основе эпоксиодно-кремнийорганической смолы Т-111, низкомолекулярного полиамида Л-20 и наполнителя – нитрида бора.

Испытания сенсора с клеем К-400 позволили установить, что данное клеевое соединение не ухудшает высокий вакуум в течейскаателе и не теряет своих свойств при нагреве кварцевого капилляра до рабочей температуры.

Изучены методы получения минимальной толщины стенки при отсутствии дефектов структуры кварцевого стекла. Для уменьшения толщины стенки применяется травление капилляра в плавиковой кислоте. Экспериментально установлено, что скорость травления кварцевого стекла составляет 70 мкм в час. Сенсор травится до толщины стенки 100 мкм.

Далее толщина и наличие дефектов в кварцевом стекле контролируется с помощью оптического микроскопа SupereyesHigh-Definition 500×. При периодическом контроле проводится дополнительное травление. Пропускная способность сенсора определяется с помощью масс-спектрометрического течеискателя ТИ1-22. Течеискатель позволяет получить зависимость потока гелия, проходящего через сенсор, от температуры кварцевого стекла.

**Макет портативного течеискателя.** Кварцевый сенсор с площадью нагреваемой поверхности 2,5 см<sup>2</sup> и толщиной стенки 60 мкм изготовлен и установлен в макет течеискателя.

Принцип действия течеискателя основан на ионизации атомов гелия в камере и измерении величины разрядного тока насоса в зависимости от концентрации ионов гелия в камере магниторазрядного насоса [3]. Пробный газ, содержащий атомы гелия, захватывается щупом течеискателя и прокачивается через сенсор, соединенный с магниторазрядным насосом. Поток газа обеспечивается малогабаритным мембранным насосом.

Сенсор выделяет атомы гелия из потока пробного газа. Из сенсора атомы гелия поступают в магниторазрядный насос, на который подается высокое напряжение. Под действием высокого напряжения в среде разряженного газа поддерживается тлеющий разряд, ионизирующий атомы гелия. Ионный ток, возникающий при ионизации атомов гелия, вызывает изменение разрядного тока магниторазрядного насоса, который пропорционален концентрации гелия в камере ионизатора. Электрический сигнал, пропорциональный току разряда в магниторазрядном насосе, обрабатывается цифровым трактом течеискателя, и на экране отображается наличие течи. Сенсор смонтирован в металлическом корпусе, соединенном при помощи штуцера и накидной гайки с камерой магниторазрядного насоса. Нагревательный элемент сенсора подключается к устройству через герметичный разъем, установленный на корпусе.

Характеристики сенсора на основе кварцевого стекла будут приводиться относительно фторопластового сенсора. Фторопласт как материал для чувствительного элемента оказался неподходящим. С течением времени сенсор из этого материала начинает пропускать не только гелий, но и молекулы, и атомы других элементов. Это ведет к неверным срабатываниям течеискателя и к засорению магниторазрядного насоса. По этой причине течеискатель выходит из строя после нескольких часов работы и требует глубокой очистки.

Принципиальная схема макета течеискателя приведена на рисунке 1.

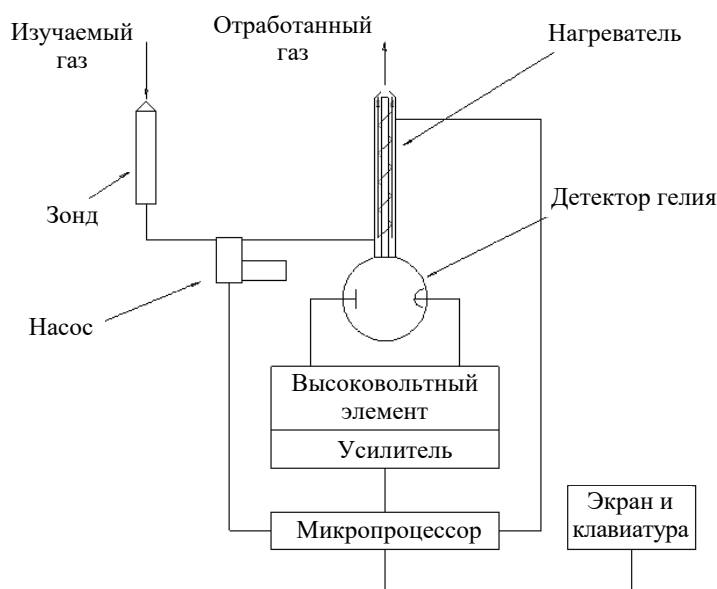


Рис. 1. Структурная схема макета течеискателя

Кварцевое стекло в качестве основы сенсора, в отличие от используемого ранее фторопласта, не засоряет детектор, в роли которого служит магниторазрядный насос. При нагревании до 300...500 °С газопроницаемость кварцевого стекла для гелия сильно возрастает, и атомы диффундируют сквозь него в

камеру детектора. Для большинства других газов, присутствующих в воздухе, проницаемость в  $10^5$  раз меньше проницаемости гелия. На этом основана селективность чувствительного элемента.

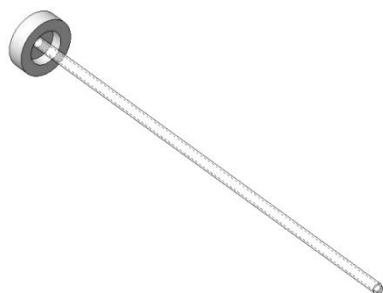


Рис. 2. Конструктивное исполнение кварцевого сенсора

Кварцевый сенсор, изготавливаемый для эксперимента, имеет внешний диаметр 1,8 мм, толщину стенки 0,1 мм, длину 60 мм. Кварцевый капилляр зафиксирован в специальной металлической шайбе, необходимой для установки чувствительного элемента в корпус прибора.

Вариант конструктивного исполнения кварцевого сенсора приведен на рисунке 2.

Для того чтобы капилляр из кварцевого стекла начал пропускать атомы гелия в камеру детектора, необходимо обеспечить эффективный нагрев.

При сборке макета течеискателя нагреватель изготавливается из нихромовой проволоки диаметром 0,2 мм, которая накручена на керамический цилиндр с отверстием для сенсора. Печка имеет сопротивление 10 Ом, напряжение аккумулятора – 20 В.

Для обеспечения портативности конечного прибора должен быть соблюден баланс температуры нагрева и потребляемой мощности подогревателя.

С помощью источника тока произведено моделирование работы печки с сенсором внутри. Зависимость температуры на поверхности сенсора от тока накала нагревательного элемента приведена на рисунке 3. Так как нагреватель изготовлен из нихрома, сопротивление которого при повышении температуры на 350 градусов изменяется лишь на 6 %, ток нагревателя может служить индикатором выделяемой мощности.

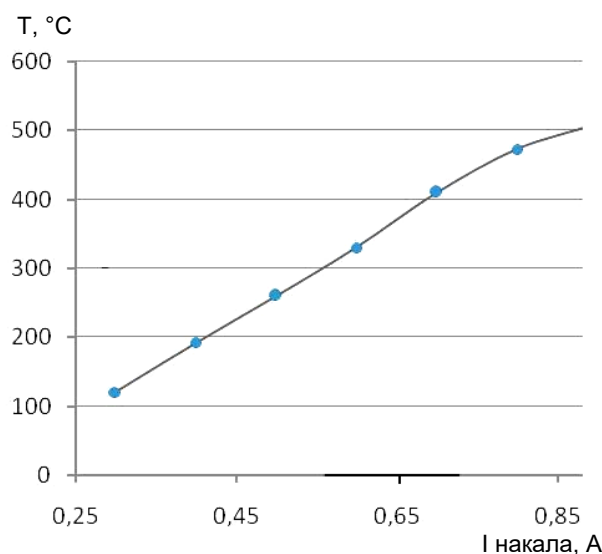


Рис. 3. Зависимость температуры на поверхности сенсора от тока накала нагревательного элемента

На основе этой зависимости и из соображений энергосбережения определен оптимальный ток накала (0,8 А), подаваемый на печку. Этот ток обеспечивает непрерывную работу прибора от аккумулятора в течение 4 часов.

На экспериментальном оборудовании получены временные зависимости тока сигнала магниторазрядного насоса при использовании сенсоров на основе кварцевого стекла и фторопласта. На основании этих данных можно судить о качестве селективирующего элемента и его пригодности для использования в портативном течеискателе.

На рисунке 4 в логарифмическом масштабе представлены величины, характеризующие колебания тока сигнала в отсутствие течи. Этот параметр дает информацию о стабильности работы течеискателя с данным сенсором, о наличии ложных срабатываний и о возможности надежного детектирования атомов гелия. Видно, что чувствительный элемент на основе кварцевого стекла позволяет сделать прибор более стабильным в работе. При этом он лучше защищает камеру детектора от попадания атмосферных газов, отличных от гелия, тем самым увеличивая срок службы магниторазрядного насоса.

Чтобы вакуумная система была чувствительной к импульсу пробного газа, который попадает в течеискатель при перемещении зондирующего шупа вблизи течи, должны выполняться определенные условия. До момента введения гелия в вакуумную систему ток магниторазрядного насоса очень мал. В процессе перемещения шупа гелиевого течеискателя вблизи места нарушения герметичности в датчике происходит повышение давления вследствие проникновения гелия, а затем быстрое его снижение вследствие процесса откачки. Характер роста и снижения давления зависит от способности кварцевого стекла при данной температуре пропускать атомы гелия в камеру детектора.

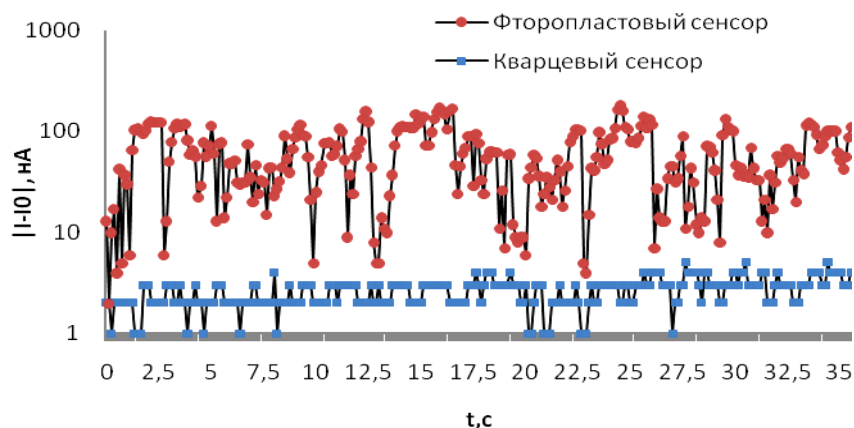


Рис. 4. Колебания тока сигнала детектора при использовании кварцевого и фторопластового сенсоров

Временная зависимость тока сигнала магниторазрядного насоса при приложении шупа к контрольной течи потоком порядка  $5 \cdot 10^{-7}$  Па $\cdot$ м<sup>3</sup>/с при времени забора пробы 3 с имеет амплитуду, превышающую флуктуации тока более чем в 5 раз.

На рисунке 5 показан ток сигнала течеискателя при обнаружении течи порядка  $5 \cdot 10^{-7}$  Па $\cdot$ м<sup>3</sup>/с при времени забора пробы 1 с.

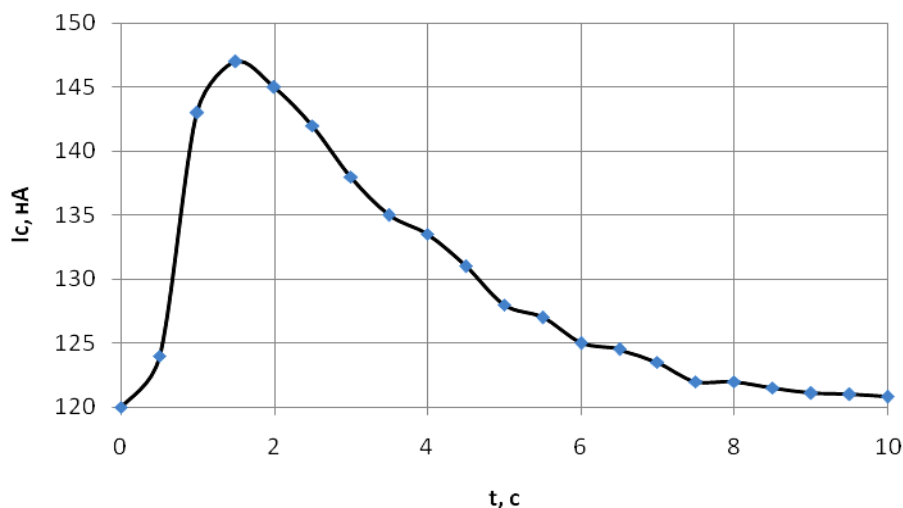


Рис. 5. Изменение тока сигнала детектора во времени при обнаружении течи  $5 \cdot 10^{-7}$  Па $\cdot$ м<sup>3</sup>/с

Превышение уровня сигнала над фоном достаточно для регистрации такой течи программным обеспечением прибора, а время возвращения в рабочий режим после обнаружения течи составляет от нескольких секунд до минуты в зависимости от величины измеряемой течи.

Макет портативного течеискателя с сенсором обладает пороговой чувствительностью порядка  $1 \cdot 10^{-7}$  Па $\cdot$ м<sup>3</sup>/с. Сенсор на основе кварцевого капилляра для течеискателя малозатратный в производстве, не требует дорогостоящих материалов и технологий. При этом по характеристикам сенсор не уступает иностранным кварцевым мембранам, изготавливаемым методами микротехнологий [4].

**Математическая модель прибора.** Разработана динамическая модель переходных процессов регистрации гелия в магниторазрядном течеискателе с мембраной.

$$P_i(t) = \frac{D_0 \cdot F \cdot Q}{S \cdot h \cdot S_{mem}} \cdot e^{\frac{H_a}{R_{mem} \cdot T}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{S}{V_{mn}} \cdot t}\right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{S_{mem} \cdot t}{V}}\right) \cdot e^{-\frac{S_{mem} \cdot (t-t_1)}{V}}, \quad (2)$$

где  $S$  – быстрота откачки магниторазрядного насоса по гелию;  $S_{mem}$  – быстрота прокачки газовой смеси;  $F$  – площадь сенсора, прогреваемая в узле сенсора;  $D_0$  – коэффициент пропорциональности для диффузии гелия через кварц в области рабочих температур;  $R_{mem}$  – постоянная величина;  $H_a$  – теплота активации диффузии гелия через кварц;  $h$  – толщина стенки кварцевого капилляра;  $T$  – температура нагреваемой поверхности кварца;  $Q$  – поток контрольной течи;  $V$ ,  $V_{mn}$  – характерные объемы канала щупа и магниторазрядного насоса;  $t_1$  – время приложения течи.

В формулу (2) подставляются величины в системе СИ. Модель позволяет узнать, какое динамическое повышение давления возникнет при приложении к щупу течеискателя течи определенного потока.

На рисунке 6 показана временная зависимость тока сигнала детектора при приложении течи потоком  $Q_{min} = 5 \cdot 10^{-7}$  Па·м<sup>3</sup>/с в течение 3 с.

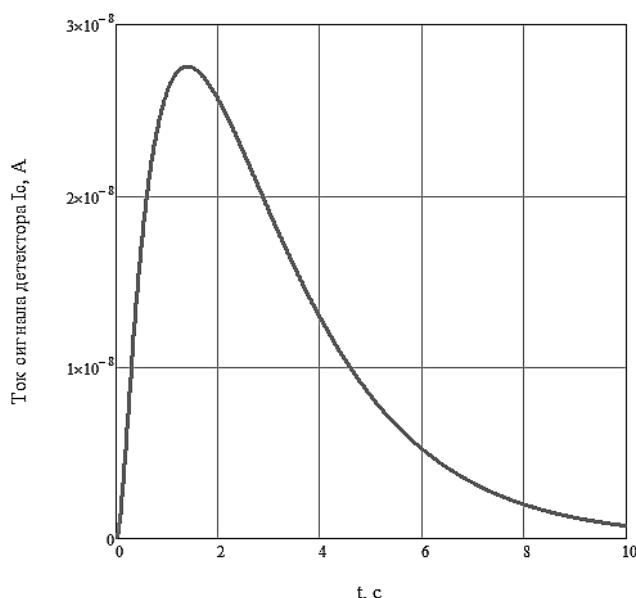


Рис. 6. Временная зависимость тока сигнала течеискателя, течь  $Q_{min} = 5 \cdot 10^{-7}$  Па·м<sup>3</sup>/с в течение 3 с при скорости откачки магниторазрядного насоса 3 л/с

При сопоставлении графиков временного изменения тока сигнала в условиях контрольной течи, полученных в результате моделирования и при экспериментальном исследовании на опытном образце прибора, имеет место соответствие практических результатов математическим расчетам. На основе полученной математической модели динамики прокачки смеси газов, диффузии и регистрации гелия детектором написана компьютерная программа для расчета амплитуды и длительности разрядного тока детектора, вызываемого гелием из течи определенного потока.

Алгоритм реализован на базе системы LABVIEW 8.6. Графический интерфейс позволяет задавать параметры различных блоков течеискателя: детектора, сенсора, системы прокачки газов через щуп.

Компьютерная программа позволяет разработчику моделировать выходной сигнал детектора течеискателя при различных параметрах составных частей прибора. Зная уровень флуктуаций фонового тока детектора, на основании данных, полученных в расчетной программе, можно проанализировать возможность регистрации течи определенного потока гелия.

Наличие математической модели сигнала течи послужило основой для разработки рекомендаций к алгоритму распознавания наличия потока гелия. Для исключения ложных срабатываний алгоритм распознавания сигнала течи должен быть настроен на регистрацию в качестве течи сигнала длительностью от 1 до 10 с. Пик разрядного тока длительностью менее 1 с связан с работой магниторазрядного насоса. Данный выброс быстро исчезает, и при правильной обработке сигнала не должен быть зарегистрирован как течь. Повышение уровня разрядного тока длительностью более 10 с связано со стабили-

защией термодинамических процессов при нагреве сенсора до рабочей температуры. Со временем рост тока магниторазрядного насоса прекращается. Постепенное нарастание сигнала при разработке алгоритма следует исключить математическими методами. Усреднение сигнала по промежутку времени 1...2 с позволяет снизить влияние колебаний фонового тока детектора. Если флуктуации фона небольшие, малые течи на таком уровне фона можно обнаружить способом периодического приравнивания значения фонового тока детектора к нулю.

**Заключение.** Расчеты и данные экспериментов показали, что сенсорная система на основе кварцевого микрокапилляра является одним из оптимальных решений для создания современного портативного гелиевого течеискателя. Диффузия газов через сенсор из кварцевого стекла в холодном состоянии на несколько порядков менее активная, чем при рабочей температуре, что защищает детектор гелия от отравления газами в процессе хранения. Количественные и временные характеристики проникания гелия через кварцевый сенсор позволяют добиться пороговой чувствительности течеискателя  $1 \cdot 10^{-7}$  Па·м<sup>3</sup>/с и времени реакции 2...3 с. Удельная расходуемая мощность на нагрев кварцевого стекла при этом составляет 10 Вт/см<sup>2</sup> активной площади сенсора при толщине стенки порядка 100 мкм.

На основании полученных данных создана методика, позволяющая судить о качестве сенсора как селективирующего гелий элемента и его пригодности для использования в портативном течеискателе. Описана математическая модель, с помощью которой можно оценить выходные динамические характеристики течеискателя с сенсором на основе кварцевого стекла с определенными параметрами.

Проведенная работа позволяет уменьшить массу и габариты отечественных гелиевых течеискателей, расширить область их применения и значительно сократить стоимость контроля герметичности в отечественной промышленности и науке.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Грошковский, Я. Техника высокого вакуума / Я. Грошковский. – М.: Мир, 1975. – 622 с.
2. Николаев, Н.И. Диффузия в мембранах / Н.И. Николаев. – М.: Химия, 1980. – 232 с.
3. Spies J., Einneuartiges Helium-Lecksuchgerut hoher Empfindlichkeit / J. Spies // *Vakuum Technik*. – 1966. – Vol. 15, № 8. – P. 185 – 191.
4. Fabrication of quartz diaphragms for helium leak detection / M. Cocuzza [et al.] // *VACUUM*. – 2006. – Vol. 80, № 5. – P. 432 – 437 с.

Поступила 25.02.2013

#### RESEARCH AND MODELLING OF THE HELIUM-SELECTIVE SENSOR FOR PORTABLE LEAK DETECTOR

V. BARCHENKO, M. VINOGRADOV

*The use of sensors made of quartz glass allows to make a portable helium leak detector. The execution of selecting elements in the capillary form provides an efficient process for the selection of helium from gas mixtures for subsequent detection. Experimental and theoretical studies of the quartz sensor carried to develop the first helium leak detector with ion pump capable to measure the helium flow  $1 \cdot 10^{-7}$  Pa·m<sup>3</sup>/s are presented. Features of technology and the checkout of the quartz sensor parameters are presented in this publication.*