

Шум конвективной природы в молекулярно-электронных преобразователях диффузионного типа

© В.М. Агафонов, Д.Л. Зайцев

Московский физико-технический институт,
141700 Долгопрудный, Московская область, Россия
e-mail: Dmitry_Zaytsev@mail.ru

(Поступило в Редакцию 11 февраля 2009 г.)

Проведено экспериментальное изучение шума молекулярно-электронного преобразователя в условиях отсутствия интегрального потока рабочей жидкости в канале. Сделан вывод о конвективной природе выявленного вида шума в рассматриваемых системах на низких частотах. Экспериментально установлена независимость величины приведенного к входному сигналу шума от конструктивных различий узла преобразователя.

Введение

Сравнительно недавно появившийся класс приборов, основанных на молекулярно-электронном переносе заряда, для регистрации механических движений сверхмалой амплитуды успешно зарекомендовал себя на рынках сейсмического мониторинга, разведки полезных ископаемых, рынке охранных технологий. Одним из наиболее существенных параметров, обеспечивающих конкурентное преимущество молекулярно-электронных преобразователей (МЭП), является низкий уровень их собственных шумов. Изучение физической природы шумовых характеристик имеет принципиальное значение для дальнейшего развития приборов на основе молекулярно-электронной технологии (МЭТ). Существует немало работ, посвященных экспериментальному и теоретическому анализу флуктуационных явлений в МЭП. Так, в частности, в [1] продемонстрировано, что на низких частотах собственный шум практически используемых преобразователей определяется гидродинамическими флуктуациями потока электролита через преобразующую ячейку. Показано, что адекватные эксперименту результаты могут быть получены, если в эквивалентной схеме преобразователя параллельно гидродинамическому сопротивлению R_g поставить источник шумового потока. Из представленной в [1] модели следует, что снижения уровня собственных шумов на низких частотах можно достичь путем уменьшения гидродинамического сопротивления системы. Однако проведенные в последнее время эксперименты убедительно показали, что снижением R_g можно сократить собственный шум системы только до определенного уровня, ниже которого основной вклад дают шумы иной природы. К таким шумам относятся, например, шумы, обусловленные геометрическими особенностями преобразующего элемента МЭП [2], вызывающие появление замкнутых вихревых микропотоков в контуре преобразователя. Кроме того, таким шумом может быть теоретически рассмотренный в [3] шум, обусловленный конвективным движением раствора электролита в поле силы тяжести в

результате локальной флуктуации концентрации ионов в растворе. Что касается высоких частот, то до недавнего времени считалось, что они обусловлены шумами сопутствующей сенсору электроники. Тем не менее экспериментальное изучение шумов в молекулярно-электронных преобразователях подробно проведенное в [4], продемонстрировало, что для частот от 1 Hz и выше вклад шума операционных усилителей применяемой для преобразования сигнального тока МЭП схемы с импедансом входного сопротивления, равным импедансу электрохимической ячейки, находится значительно ниже экспериментально регистрируемых значений шума, а сам шум обусловлен процессами, также связанными с естественной конвекцией электролита. Кроме того, было сделано предположение о том, что и на более низких частотах основной вклад в шум МЭП, в котором исключена возможность интегрального потока электролита — МЭП ампульного типа, вносят конвективные процессы в преобразователе. Кроме того, в [4] было подробно изучено влияние концентрации электроактивных ионов на шумовые характеристики МЭП ампульного типа, но не было проведено экспериментальных измерений, соответствующих изменению межэлектродного расстояния, что также может оказать влияние на спектр собственного шума преобразователя. Трудность в изучении шумов конвективной природы для МЭП, как правило, заключается в сложности строгой математической модели и отсутствии достаточной экспериментальной базы.

В настоящей работе проводится экспериментальное изучение шумов молекулярно-электронных преобразователей с неподвижной инерционной массой (МЭП ампульного типа), имеющих различные конструктивные особенности электродного узла. Изучается влияние температурных колебаний и естественной конвекции на собственный шум молекулярно-электронных измерителей.

Эксперимент и обсуждение результатов

Объектом исследования стали три модификации преобразователей ампульного типа со следующими конструктивными отличиями.

1) *G*-тип — герметичный корпус, полностью заполненный электролитом на основе *KJ* с добавлением J_2 концентрации — 0.03 М, без упругих возвращающих элементов, четырехэлектродный преобразователь с расстоянием между электродами $D \sim 40 \mu\text{m}$.

2) *GAS*-тип — герметичный корпус, полностью заполненный электролитом на основе *KJ* с добавлением J_2 концентрации — 0.03 М, без упругих возвращающих элементов, четырехэлектродный преобразователь с расстоянием между электродами $D \sim 40 \mu\text{m}$, с дополнительными пористыми диэлектрическими прокладками в заанодной области (Additional Spacers).

3) *SAS*-тип — расстояние между электродами в узле МЭП увеличено в 4 раза по сравнению с преобразователями *GAS* типа и достигает значения $D \sim 120 \mu\text{m}$, также с дополнительными пористыми диэлектрическими прокладками в заанодной области, в герметичном корпусе, полностью заполненном электролитом на основе *KJ* с добавлением J_2 концентрации — 0.03 М, без упругих возвращающих элементов.

На рис. 1 представлено схематичное изображение электронного узла преобразователя.

Шумовой сигнал МЭП снимался с резистора первого каскада усиления, преобразующего сигнальный ток МЭП в выходное напряжение. Выходное напряжение с испытуемых приборов подавалось на 22-разрядную многоканальную систему сбора данных с частотой опроса 40 Hz. Испытуемые сенсоры были установлены в помещении с пониженным внешним шумовым фоном во избежание паразитного влияния внешних факторов на результаты измерений собственных шумов преобразователей ампульного типа и сориентированы таким образом, что канал преобразователя был параллелен ускорению свободного падения.

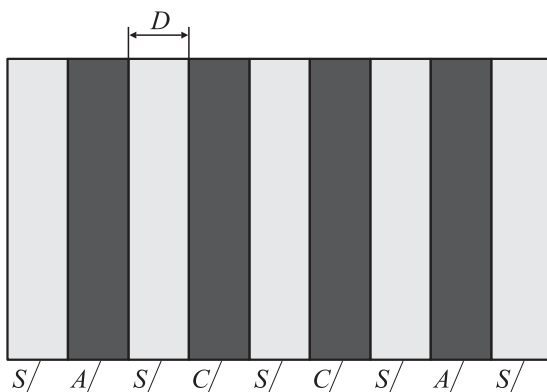


Рис. 1. Эскиз электродного узла преобразователя. *S* — диэлектрические прокладки, *A* — аноды узла, *C* — катоды узла, *D* — межэлектродное расстояние.

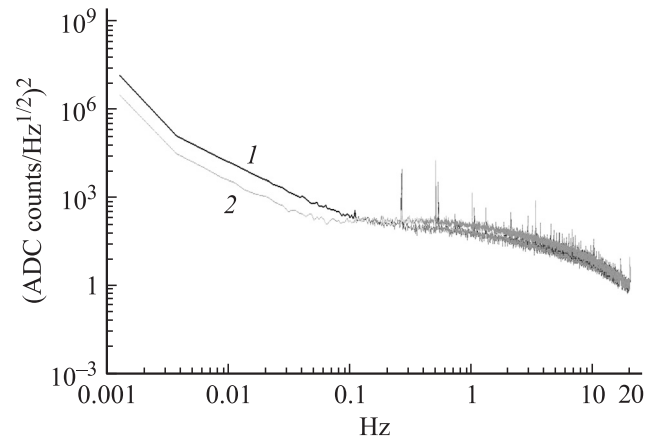


Рис. 2. Спектральная плотность мощности (СПМ) исследуемых преобразователей. 1 — преобразователь *G*-типа, 2 — преобразователь *GAS*-типа.

На рис. 2 представлен пример сравнения спектральной плотности мощности СПМ (Power Spectral Density) собственных шумов для испытуемых преобразователей типа *G* и *GAS*.

Экспериментально было установлено, что все МЭП начиная с некоторых частот демонстрируют идентичный подъем в низкочастотную область спектра (рис. 2), что свидетельствует о единой природе, обуславливающей такое поведение сенсоров. В этой связи была предложена версия возникновения низкочастотного подъема собственных шумов, обусловленного несколькими факторами, а именно медленным изменением температуры окружающей среды сенсоров, а также процессом установления фоновых токов в МЭП. Однако изучение самих указанных явлений не представляет особого интереса, поскольку влияние температуры может быть либо учтено соответствующей моделью ошибок, либо нивелировано проведением экспериментов в термостабильных условиях. А установление фоновых токов становится малозаметным после достаточно продолжительного нахождения МЭП под током. О том, что подъем СПМ в основном обусловлен внешним воздействием, свидетельствует тот факт, что при проведении корреляции между сигналами двух различных сенсоров удается значительно снизить составляющую низкочастотного подъема. Поскольку преобразователь ампульного типа по сути не чувствителен к внешнему механическому воздействию, существование коррелированной части в данных, полученных от различных сенсоров, вполне объяснимо с точки зрения температурного воздействия.

В указанных обстоятельствах, прежде всего, необходимо было устранить влияние медленного изменения температуры при проведении шумовых измерений. С этой целью была разработана методика исключения паразитного влияния изменения температуры на основе показаний термодатчика, который располагался в непосредственной близости от исследуемых МЭП.

В качестве сенсора температурных измерений применялся терморезистор номиналом $47\text{ k}\Omega$, на терморезистор подавалось постоянное напряжение $\sim 300\text{ mV}$, а изменение электрического сопротивления с температурой приводило к вариациям напряжения на сопротивлении обратной связи в первом каскаде усиления, которые и записывались системой сбора данных.

Пусть U_T, U_A — сигналы, регистрируемые датчиками температуры и преобразователем ампульного типа; a — внешний возмущающий сигнал, обусловленный температурным дрейфом — U_{in} . Вычислим некоррелированную шумовую добавку в сигнал преобразователя, регистрируемый АЦП, т.е. вычтем из U_A коррелированную температурную добавку в общий шум, регистрируемый преобразователем ампульного типа. Предположим, что термодатчик „не шумит“, т.е. $U_T = W_T U_{in}$, тогда

$$U_A = W_A U_{in} + N_A,$$

где N_A — сигнал (шум) на выходе МЭП за исключением коррелированной с термодатчиком части, W_A — коэффициент электрохимического преобразователя МЭП, W_T — коэффициент преобразования воздействия температуры на термодатчик в вариации напряжения на входе АЦП. Тогда для выписанных уравнений можно составить систему

$$\begin{cases} \langle |U_T|^2 \rangle_\omega = \langle |U_{in}|^2 \rangle_\omega W_T^2, \\ \langle |U_A|^2 \rangle_\omega = \langle |U_{in}|^2 \rangle_\omega W_A^2 + \langle |N_A|^2 \rangle_\omega W_A^2, \\ \langle U_T^* U_A \rangle_\omega = W_T^* W_A \langle |U_{in}|^2 \rangle_\omega, \\ \langle U_T U_A^* \rangle_\omega = W_T W_A^* \langle |U_{in}|^2 \rangle_\omega, \end{cases}$$

где U^* — комплексное сопряжение к U . Преобразования, аналогичные проделанным в работе [5], приводят к формуле для вычисления спектральной плотности мощности сигнала, из которого вычитается коррелированная с температурным сенсором составляющая:

$$\langle |N_A|^2 \rangle_\omega = \langle |U_A|^2 \rangle_\omega - \frac{\langle U_T^* U_A \rangle_\omega \langle U_T U_A^* \rangle_\omega}{\langle |U_T|^2 \rangle_\omega}. \quad (1)$$

Формула (1) использовалась при обработке экспериментальных данных. Для анализа был выбран достаточно продолжительный участок шумовой записи, в течение которого наблюдалось линейное изменение температуры окружающей среды. На рис. 3 представлены обработка шумового сигнала из преобразователей с использованием корреляции с данными термодатчика, а также результат обработки данных, из которых исключена линейная составляющая сигнала, программной функцией. Оказалось, что линейный рост спектральной плотности мощности преобразователей ампульного типа обусловлен температурным влиянием окружающей среды. В качестве меры для снижения возможного влияния процесса установления фоновых токов на низкочастотный рост СПМ принималось длительное (порядка

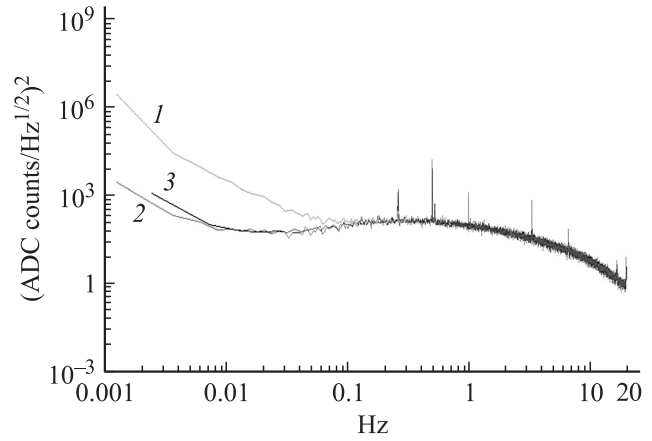


Рис. 3. СПМ МЭП *GAS*-типа. 1 — СПМ необработанного сигнала, 2 — СПМ сигнала без линейной составляющей дрейфа, 3 — СПМ необработанного сигнала после вычитания коррелированной с температурным датчиком части.

нескольких часов) нахождение тестируемых сенсоров под током, перед началом экспериментальных измерений. Этого времени выдерживания с большим запасом хватает для установления фоновых токов преобразователей с последующими вариациями не более нескольких процентов [6].

С учетом представленных данных дальнейшая обработка сигналов проводилась с использованием указанных методов исключения низкочастотного подъема спектральной плотности мощности выходного сигнала преобразователей ампульного типа, не связанного с их собственными шумами.

На рис. 4 представлены результаты обработки полученных шумовых данных для сенсоров типа *G* и *GAS*. Кроме того, на этом же рисунке приведен шум регистрирующей аппаратуры, или шум *DASa* (*Data Acquisition System*), который был снят со свободного канала системы сбора данных в эксперименте.

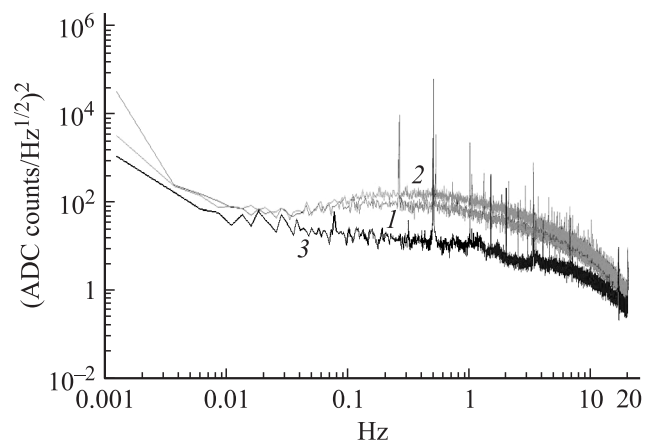


Рис. 4. СПМ сигнала исследуемых преобразователей после вычитания температурного дрейфа. 1 — преобразователь типа *G*, 2 — типа *GAS*, 3 — шум *DAS*.

Проанализируем полученные данные. Во-первых, очевидно, что измеренные шумы лежат существенно выше шумов регистрирующей аппаратуры. Во-вторых, на рис. 4 наблюдается совпадение спектральных плотностей мощности шума сравниваемых преобразователей в полосе от 0.004 до 0.1 Hz. При этом на более высоких частотах СПМ преобразователя типа *G* лежит ниже СПМ преобразователя типа *GAS*. Кроме того, существенные особенности имеет и форма спектральной плотности мощности шума для исследуемых преобразователей. Так, спектральная плотность мощности преобразователя типа *G* выходит на „полочку“ в сторону низких частот с небольшим (~30%) „прогибом“ в полосе от 0.01 до 0.5 Hz, тогда как СПМ преобразователя типа *GAS* имеет видимый „провал“ (~2–3 раз) в шумовом спектре в полосе 0.007–0.5 Hz.

С точки зрения практических измерений принципиально важно знать шум преобразователей в единицах измеряемого сигнала. Поскольку преобразователи ампульного типа не чувствительны к внешнему механическому сигналу, нет возможности произвести калибровку сенсоров и экспериментально определить их коэффициент преобразования. Так как вопрос чувствительности сенсоров в исследуемой полосе частот остается открытым, одним из методов сравнения шумовых характеристик сенсоров является их приведение к средней величине фоновых токов сенсора, подобный способ, в частности, применялся при анализе результатов работ [7–9]. На рис. 5 изображены результаты обработки данных шумовых измерений, приведенные к величине фонового тока соответствующего сенсора.

Из рис. 5 видно, что приведенная величина шума для сенсоров без дополнительных прокладок (типа *G*) на низких частотах выше аналогичного шума для сенсоров с дополнительными прокладками (типа *GAS*), а на высоких частотах спектральные плотности мощностей преобразователей имеют одинаковые значения.

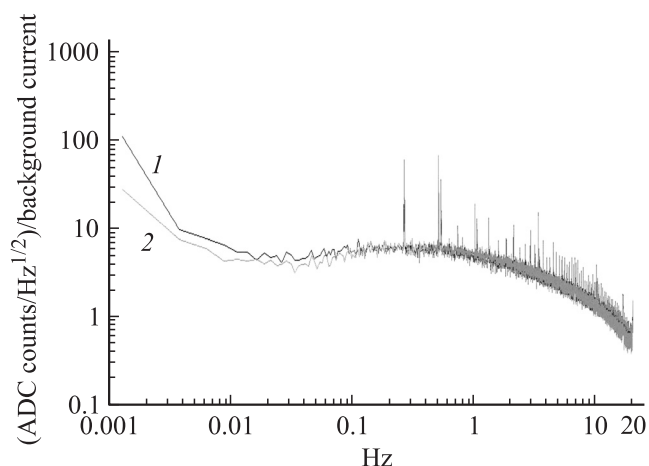


Рис. 5. Квадратный корень СПМ сигнала сенсоров, приведенный к величинам фоновых токов. 1 — преобразователь типа *G*, 2 — типа *GAS*.

Таким образом, спектральные плотности мощности шума для сенсоров типа *G* и типа *GAS* оказываются одинаковыми на низких частотах, а после приведения к величинам фоновых токов сравниваются в полосе более высоких частот. Отметим существенный момент, обнаруженный в эксперименте: величины фонового тока всегда оказывались выше у сенсоров с дополнительными прокладками в заанодной области. Это означает, что преобразователи типа *GAS* имеют больший градиент концентрации носителей тока.

Указанные обстоятельства свидетельствуют о пропорциональности шума величине фонового тока на высоких частотах. Таким образом, эффективный метод сравнения шумов двух сенсоров состоит в сопоставлении шумов, приведенных ко входу преобразователя, т.е. шума, измеренного на выходе прибора, отнесенного к его передаточной функции. Электрохимическая передаточная функция МЭП, в соответствии с [10], пропорциональна на высоких частотах градиенту концентрации активных носителей тока, которому в свою очередь также пропорционален и фоновый ток, а на низких частотах определяется концентрацией активных ионов трийодида (в растворе *KJ* почти полностью диссоциирует с образованием J^- и K^+ , а молекулярный йод вступает в реакцию с ионами J^- , с образованием трийодида J_3^-). Указанную закономерность как раз и удалось наблюдать в эксперименте. Поскольку сенсоры заполнены одинаковым электролитом, то при сравнении не приведенных спектральных характеристик они демонстрируют одинаковую величину шума на низких частотах: на более высоких в соответствии с пропорциональностью электрохимической передаточной функции градиенту концентрации и фоновому току, приведенные шумовые характеристики также сравниваются. Это означает, что шум, приведенный ко входу, не меняется при переходе от геометрии ячейки типа *G* к ячейке типа *GAS* и тем не менее в полосе от 0.1 до 10 Hz спектральная плотность шума пропорциональна фоновому току и соответственно градиенту концентрации носителей на катоде.

Следуя предположениям, сформулированным в работе [4], о проявлении в исследуемой полосе частот в преобразователях ампульного типа шумов, связанных с естественной конвекцией в межэлектродном пространстве, проследим, как соотносятся обнаруженные закономерности с величиной числа Рэлея, определяемого в [4] следующим образом:

$$R_a = \frac{g\beta\nabla c_0 d^4}{\nu D}. \quad (2)$$

Здесь g — ускорение свободного падения, ν — коэффициент кинематической вязкости, D — коэффициент диффузии ионов в растворе электролита, ρ_0 — средняя плотность раствора, $\beta = \rho_0^{-1}(\partial\rho/\partial c)_{c=c_0}$ — массовый коэффициент; d — расстояние между электродами; ∇c_0 — градиент концентрации электроактивных ионов между электродами.

В [4] было показано, что на низких частотах возрастание числа Рэлея приводило к росту шума естественной конвекции. Однако результаты были получены для различных значений концентрации растворов электролита, которые в свою очередь определяли величину градиента в формуле (2). И с этой точки зрения в [4] было не важно, каким образом определять число Рэлея — через ∇c_0 или через отношение c_0/c . Как следует из представленных экспериментальных данных, этот выбор и неоднозначность в определении числа R_a , характеризующего конвективные процессы в системе, играет существенную роль для интерпретации шумов на низких частотах. К примеру, сравнивая шум на низких частотах преобразователей типа *G* и *GAS*, можно прийти к выводу, что изменился ∇n_0 (увеличился благодаря заанодным прокладкам, экспериментально наблюдается более высокая величина фонового тока), однако шум не изменился. Поэтому более правильным является следующее определение числа

$$R_a = \frac{g\beta c_0 d^3}{\nu D}. \quad (3)$$

Таким образом, полученные экспериментальные данные в области низких частот не противоречат сделанным в [4] предположениям о проявлении шума естественной конвекции в преобразователях ампульного типа, совпадение спектральных характеристик на низких частотах находится в соответствии с сохранением величины числа R_a при переходе к иной геометрии ячейки. С другой стороны, на высоких частотах, где существенную роль начинают играть процессы, протекающие в непосредственной близости от электродов, за меру конвективных шумов целесообразнее выбрать R_a в соответствии с формулой (2), также можно получить качественное совпадение экспериментальных результатов с предположением о проявлении и в этой области частот шумов конвективной природы.

Количественную проверку сделанных предположений можно осуществить, изменив число R_a , например, путем увеличения межэлектродного расстояния d . С этой целью были изготовлены преобразователи ампульного типа *SAS*. На рис. 6 и 7 представлено сравнение СПМ для преобразователей ампульного типа *SAS* и *GAS* с дополнительными пористыми диэлектрическими прокладками в области за анодами. Преобразователи различаются только межэлектродным расстоянием ($GAS \sim 30$, $SAS \sim 120 \mu\text{m}$).

Из экспериментальных данных следует, что форма спектральной плотности мощности шума преобразователей типа *SAS* существенно отличается от аналогичной для преобразователей типа *GAS*. Преобразователь типа *SAS* не обнаруживает характерного для преобразователей типа *GAS* „провала“ СПМ в полосе частот от 0.007 до 0.5 Hz, т.е. форма спектральной плотности мощности шума сенсоров *SAS*-типа не имеет „горба“ в полосе частот от 0.05 до 5 Hz и достаточно равномерно

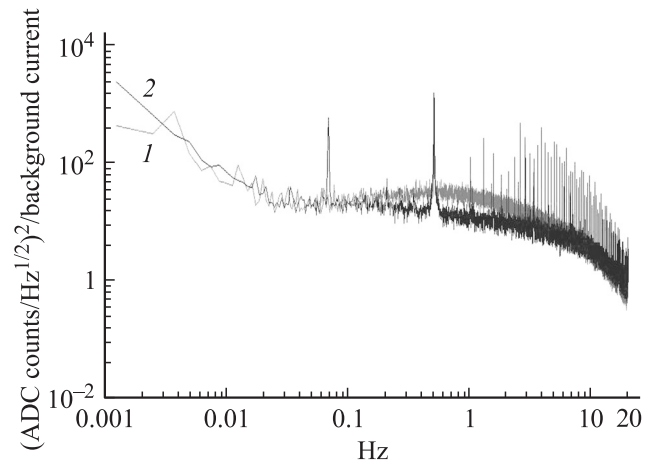


Рис. 6. СПМ сигнала сенсоров *SAS* (2) и *GAS* (1) в термостабильных условиях.

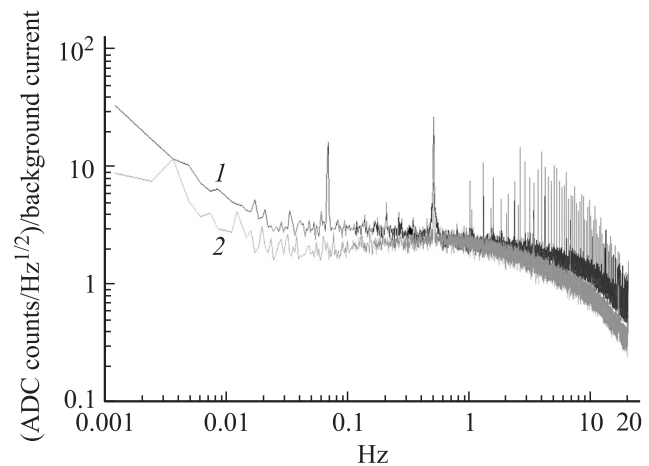


Рис. 7. Квадратный корень из СПМ сигнала сенсоров *SAS*-типа (1) и *GAS*-типа (2) в термостабильных условиях, приведенный к величинам фоновых токов.

изменяется в сторону низких частот. Кроме того, на низких частотах (0.03–0.15 Hz) происходит совпадение значений спектральных плотностей мощности шумовых сигналов МЭП ампульного типа *GAS* и *SAS*. В то же время на рис. 7 видно совпадение высокочастотных частей шумового спектра, приведенных к значениям фоновых токов. Поскольку величина фонового тока прямо пропорциональна градиенту концентрации ионов электролита, то для преобразователей типа *GAS* с межэлектродным расстоянием $\sim 30 \mu\text{m}$ она будет больше, чем для *SAS*-типа с расстоянием между электродами $\sim 120 \mu\text{m}$.

Из представленных данных следует, что величина приведенного ко входу шума экспериментально получается одинаковой для различных типов преобразователей ампульного типа, отличающихся межэлектродным расстоянием и наличием дополнительных диэлектрических прокладок в области за анодами ячейки. На высоких

частотах следует приводить шумовые измерения к величине фонового тока в системе, как это сделано в работах [7–9], а на низких частотах — к величине концентрации электроактивных ионов. Что касается предположения о конвективной природе наблюдаемого шума, то в поставленном эксперименте оно подвергается сомнению, поскольку увеличение числа R_a системы не только не привело к возрастанию шума, но экспериментальная спектральная плотность на высоких частотах оказывается ниже для системы с большим числом Рэлея.

Таким образом, представленных экспериментальных данных явно не хватает для того, чтобы сделать вывод о природе наблюдаемых шумовых процессов. С одной стороны, если число Рэлея, определяемое формулами (2) или (3), считать числом, характеризующим величину конвективного шума системы, то в первом эксперименте наблюдается качественное совпадение экспериментальных данных с предположением о конвективной природе регистрируемого шума. Тогда как во втором эксперименте увеличение межэлектродного расстояния и соответствующее увеличение числа Рэлея для системы по (2) и (3) не приводит к росту приведенного шума, что в свою очередь может опровергать гипотезу о возникновении конвективных потоков в преобразователях ампульного типа.

Поскольку существенной особенностью естественной конвекции является зависимость интенсивности конвективных потоков от ориентации электрохимической ячейки по отношению к направлению силы тяжести, проведем аналогичную серию экспериментов в условиях, благоприятных для возникновения естественной конвекции, при расположении каналов преобразователей перпендикулярно ускорению свободного падения (рис. 8–10). Шумовые показания всех типов испытываемых преобразователей ампульного типа чувствуют изменение положения сенсора к ускорению свободного падения. Ориентация канала, перпендикулярная g , приводит к значительному

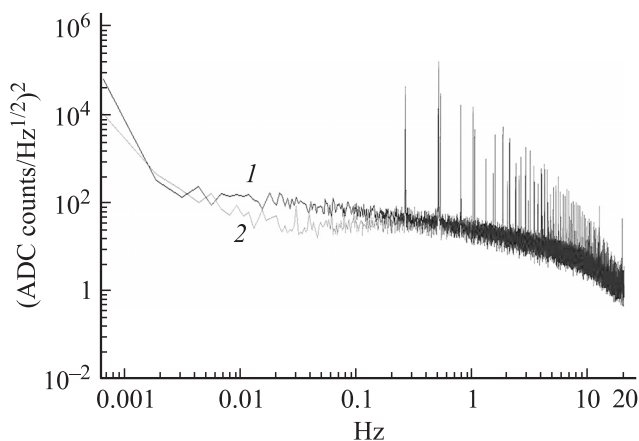


Рис. 8. СПМ сигналов сенсора типа G в различных положениях относительно g , в термостабильных условиях. 2 — ось канала параллельна направлению g , 1 — ось канала перпендикулярна направлению g .

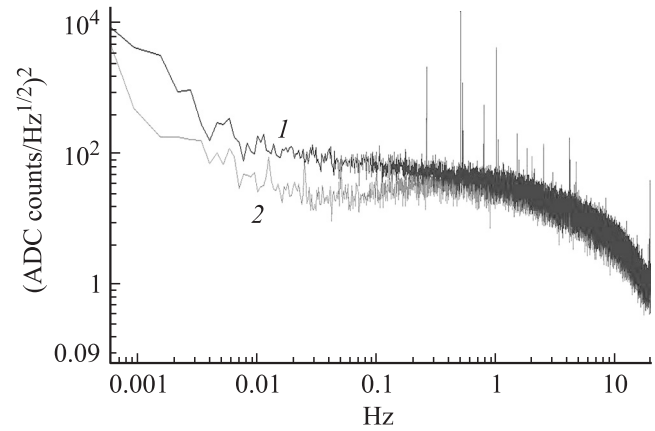


Рис. 9. СПМ сигналов сенсора типа GAS в различных положениях относительно g , в термостабильных условиях. 2 — ось канала параллельна направлению g , 1 — ось канала перпендикулярна направлению g .

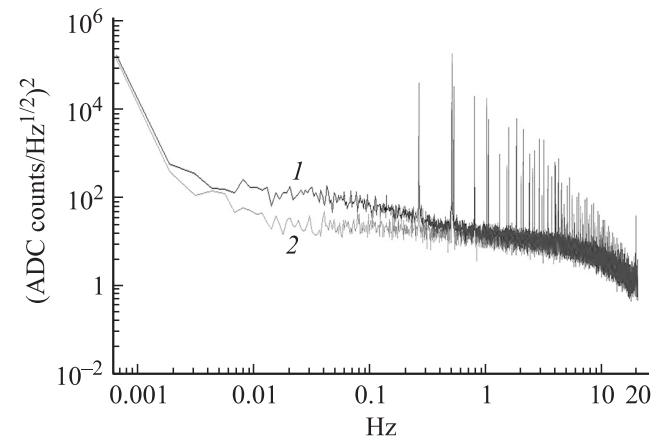


Рис. 10. СПМ сигналов сенсора типа SAS в различных положениях относительно g , в термостабильных условиях. 2 — ось канала параллельна направлению g , 1 — ось канала перпендикулярна направлению g .

возрастанию мощности шумового спектра в характерной полосе частот. Физику явления представить себе достаточно просто. Поскольку вблизи катодов слой жидкости сильно обеднен по молекулярному йоду, плотность ее оказывается меньшей объемного значения, что приводит к схеме конвективных потоков. Существенным является тот факт, что величины фоновых токов сохранились при различной ориентации сенсоров в поле силы тяжести.

Все преобразователи ампульного типа демонстрируют возрастание спектральной плотности мощности шумового сигнала. Для различных типов преобразователей в частности получается следующее:

- 1) тип G — полоса частот, в которой наблюдается возрастание шума — от 0.007 до 0.3 Hz;
- 2) тип GAS — полоса частот, в которой наблюдается возрастание шума — от 0.007 до 0.5 Hz;

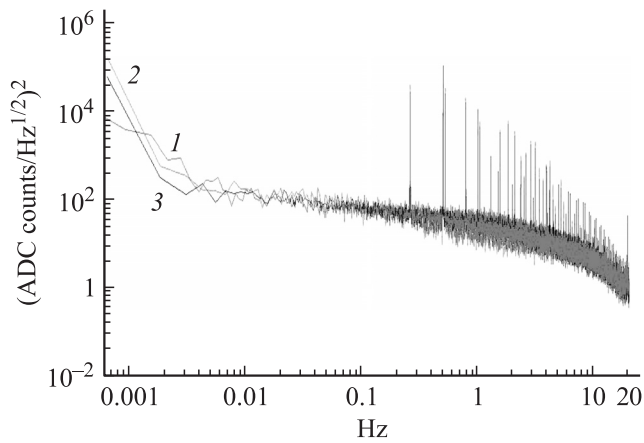


Рис. 11. СПМ шума сенсоров в положении, перпендикулярном g (1 — GAS, 2 — SAS, 3 — G).

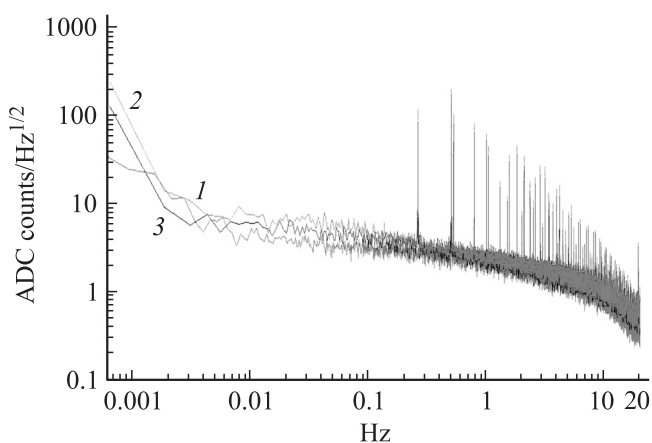


Рис. 12. Квадратный корень из СПМ сигнала сенсоров в перпендикулярном g положении (1 — GAS, 2 — SAS, 3 — G), приведенный к величинам фоновых токов.

3) тип SAS — полоса частот, в которой наблюдается возрастание шума — от 0.005 до 1 Hz.

При этом у всех преобразователей шум поднимается на одинаковую максимальную величину ~ 6 dB по мощности. Представленные данные свидетельствуют о возникновении дополнительного шума конвективной природы (см. [11]).

На рис. 11, 12 приведено сравнение шумов в положении оси чувствительности, перпендикулярном ускорению свободного падения. Несмотря на возрастание шума в указанных полосах частот для каждого сенсора они снова сравниваются на низких частотах в пределах полосы 0.004–0.2 Hz при анализе спектральной плотности мощности шума. Анализ шумов, приведенных к значению фоновых токов, снова выявляет совпадение шумов для различных сенсоров в полосе от 0.3–5 Hz. Таким образом, регистрируемый на низких частотах шум обусловлен возникновением конвективных потоков в узле преобразователя, но заданное выражениями (2) и (3) число Рэлея не описывает наблюдаемых в эксперименте

закономерностей, поскольку изменение межэлектродного расстояния не изменяет величины конвективного шума. В указанных обстоятельствах можно предположить, что характерный размер возникающего конвективного вихря превосходит размер межэлектродного расстояния и, возможно, охватывает весь электродный пакет. Тогда величина конвективного шума не будет столь чувствительной к изменению расстояния между электродами узла преобразователя.

Обобщение экспериментальных результатов

Таким образом, представленные данные дают основание полагать природой шума МЭП ампульсного типа в полосе частот 0.007–0.2 Hz явления, обусловленные естественной конвекцией электролита вблизи электродов. Этот шум существенно зависит от ориентации МЭП относительно ускорения свободного падения и одинаково проявляется для всех типов преобразователей. Показано, что шум в системе МЭП ампульсного типа, приведенный „ко входу“, не чувствителен к изменению межэлектродного расстояния (по крайней мере, со 120 до $40 \mu\text{m}$), а также к расположению в области за анодами электродного узла дополнительных диэлектрических прокладок. Также продемонстрировано, что сравнение шумовых характеристик МЭП ампульсного типа на низких частотах необходимо производить, сопоставляя непосредственно величины спектральных плотностей мощности шумовых сигналов с учетом концентрации электроактивных ионов, тогда как на более высоких частотах уже величины, отнесенные к фоновым токам преобразователей. Представленные результаты согласуются с развитой в [2] теорией возникновения замкнутых вихревых микропотоков, в той части, что поведение спектральной плотности шума коррелирует с частотным поведением электрохимического коэффициента преобразования.

Заключение

1) Установлена конвективная природа шума в молекулярно-электронных преобразователях ампульсного типа, проявляющего чувствительность в ориентации по отношению к ускорению свободного падения.

2) Выявлена полоса частот, в которой представленный шум доминирует над остальными механизмами шумов в МЭП, в которых ограничен интегральный поток жидкости через преобразователь. Для МЭП типа G — 0.007 до 0.4 Hz, для МЭП типа S — 0.005–1 Hz.

3) Экспериментально установлено отсутствие зависимости величины приведенного ко входному сигналу шума МЭП ампульсного типа от расстояния между электродами узла, а также наличия дополнительных диэлектрических прокладок к заанодной области преобразователя.

4) Разработана методика устранения влияния температурных флуктуаций при измерении на шумовые показатели МЭП.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 07-07-12055-офи и 08-07-00475а.

Список литературы

- [1] *Козлов В.А., Сахаров К.А.* // Физические основы жидкостных и твердотельных измерительных систем и устройств обработки информации. М.: МФТИ, 1994. С. 43–49.
- [2] *Зайцев Д.Л., Дудкин П.В., Агафонов В.М.* // Изв. вузов. Электроника. 2006. № 5. С. 61–68.
- [3] *Сафонов М.В.* // Исследовано в России. 2004. С. 2433–2447. <<http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/228./pdf>>.
- [4] *Сафонов М.В.* Конвективная диффузия и шумы в молекулярно-электронных структурах. Автореф. дисс. Долгопрудный, 2007.
- [5] *Зайцев Д.Л.* Исследование собственных шумов молекулярно-электронного преобразователя диффузионного типа. Долгопрудный, 2003.
- [6] *Вишняков А.В.* Исследование устойчивости молекулярно-электронных преобразователей с мгд-обратной связью в переходных режимах и при наличии тока утечки. Долгопрудный, 2005.
- [7] *Тягай В.А., Лукьянчикова Н.Б.* // Электрохимия. 1967. Т. 3. № 3. С. 316–322.
- [8] *Тягай В.А.* // Электрохимия. 1967. Т. 3. № 11. С. 1331–1339.
- [9] *Тягай В.А., Колбасов Г.Я.* // Электрохимия. 1971. Т. 7. № 3. С. 299–305.
- [10] *Агафонов В.М., Криштон В.Г.* // Электрохимия. 2004. Т. 40. № 5. С. 606–611.
- [11] *Тягай В.А.* // Электрохимия. 1971. № 12. С. 1734–1736.