

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУХОГО ОСТАТКА ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ МЕТОДОМ ПЬЕЗОКВАРЦЕВОГО МИКРОВЗВЕШИВАНИЯ

Сухой остаток воды с большой полнотой характеризует ее качество, так как содержит все примеси, в том числе и нелетучие органические вещества. Поэтому масса сухого остатка может характеризовать глубину очистки питьевой воды и является важным показателем ее качества. В настоящее время этот параметр определяется гравиметрическим методом. Определение массы сухого остатка этим методом требует значительного времени для проведения анализа и использования большой массы вещества. Этих недостатков лишены кварцевые микровесы, чувствительным элементом которых является кварцевый пьезорезонатор. Целью данной работы является оценка возможности использования метода пьезокварцевого микровзвешивания для экспресс-анализа качества питьевой воды. Применение этого высокочувствительного к массе метода (10^{-8} – 10^{-9} г) позволяет существенно уменьшить массу используемой для опыта воды и, соответственно, время проведения анализа, которое определяется временем испарения вещества. Для выполнения опытных исследований был создан экспериментальный модуль на основе кварцевого пьезорезонатора. С помощью калибровочных измерений определялся массочувствительный коэффициент микровесов. Для заданных условий эксперимента (температура 20 °С, давление 105 Па) он равен $S_f = (9,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-9}$ г/Гц. Для оценки возможности практического использования метода пьезокварцевого микровзвешивания были проведены исследования различных образцов питьевой воды и выполнен анализ полученных результатов. На основании опытных данных был рассчитан параметр X , который характеризует массу сухого остатка в литре воды. В ходе выполнения опытных исследований было установлено, что используемая в эксперименте водопроводная вода по величине параметра X является оптимально минерализованной, а ее очистка с помощью бытового фильтра незначительно уменьшает количество сухого остатка. При кипячении воды часть растворенных в ней веществ выпадает в осадок, но ее минерализация остается удовлетворительной. В процессе дистилляции величина сухого остатка значительно уменьшается и вода становится слабоминерализованной. Полученные в работе результаты согласуются с известными опытными данными. Таким образом, метод пьезокварцевого микровзвешивания можно использовать для определения сухого остатка питьевой воды при оценке ее качества в различных технологических процессах.

Ключевые слова: оценка качества воды, степень очистки, сухой остаток воды, пьезокварцевое микровзвешивание.

Одним из важнейших показателей качества питьевой воды является количество растворенных в ней веществ. К ним относятся минеральные неорганические соли кальция и натрия, бикарбонаты, хлориды, сульфаты и различные нелетучие органические соединения. При испарении воды эти вещества остаются на поверхности сосуда в виде так называемого сухого остатка. Вода с его повышенным содержанием характеризуется неприятным вкусом и при использовании ее в быту приводит к образованию нежелательного осадка на различных поверхностях. Кроме того, высокое содержание сухого остатка может указывать на присутствие в воде ионов токсичных металлов. Вода с низким содержа-

нием сухого остатка также может быть неприятна на вкус и небезопасна при постоянном употреблении. Следовательно, определение и регулирование величины сухого остатка является жизненно необходимым процессом. Предельно допустимая концентрация сухого остатка (ПДК) в питьевой воде составляет 1000 мг/л.

Воду с сухим остатком свыше 1000 мг/л называют минерализованной, до 1000 мг/л — пресной. Воду, содержащую до 50–100 мг/л, считают слабоминерализованной, 100–300 мг/л — удовлетворительно минерализованной, 300–500 мг/л — оптимальной минерализации и 500–1000 мг/л — повышенно минерализованной [1].

Определение сухого остатка питьевой воды в настоящее время производится гравиметрическим методом [2]. Этот метод основан на измерении веса высушенного остатка после выпаривания пробы воды объемом 250–500 мл. Взвешивание выполняется на аналитических весах. Определение этим методом величины сухого остатка весьма длительно (2–3 часа) и трудоемко. Точность определения в среднем составляет 0,1–0,2 %. Поэтому метод, в основном, используется для анализа проб воды с массовой долей сухого остатка больше 0,1 %. Возможности метода не позволяют применять его для контроля технологического процесса [3].

Если уменьшить погрешность измерения массы до 10^{-8} – 10^{-9} г, то можно существенно уменьшить количество исследуемой воды (до 0,01 г) и время анализа (10–15 мин), одновременно повысив точность определения до 0,001 %. Такая возможность появляется при использовании для определения сухого остатка жидкости метода пьезокварцевого микровзвешивания [4]. Этот метод применяется при изучении процессов, сопровождающихся изменением массы вещества на поверхности пластины кварцевого резонатора, изменение частоты колебаний которого Δf зависит от величины массы Δm [5]. В работе [6] было показано, что

$$\Delta f = \frac{f_0^2 \Delta m}{\rho N_f S}, \quad (1)$$

где f_0 — собственная частота колебаний резонатора; ρ — плотность материала резонатора (кварц); S — площадь поверхности резонатора, N_f — частотный коэффициент.

Пропорциональная зависимость Δm от Δf подтверждается экспериментально путем градуировки микровесов по электронным весам при фиксированных значениях температуры, давления, характера распределения вещества на поверхности резонатора и др. [7].

Возможности этого метода позволяют исследовать различные физические процессы, которые могут происходить на поверхности кварцевого пьезорезонатора. Метод пьезокварцевого микровзвешивания использовался для изучения конденсации воды из пара и фазового перехода в тонкой пленке [8], а также для исследования процесса адсорбции газов [9]. Кроме этого, пьезокварцевое микровзвешивание применяется для определения толщины пленок вещества и нахождения концентрации веществ в растворах [5].

Экспериментальная установка и методика измерений. Экспериментальные исследования проводились с помощью измерительного модуля, блок-схема которого представлена на рис. 1.

Для проведения опытных исследований использовался кварцевый резонатор 1 АТ срез с частотой $f_0 = 6,3$ МГц, который размещался в измерительной ячейке 2. На его основе был собран кварцевый генератор 3 [10], питание которого производилось от источника постоянного тока 4. Для определения изменения частоты Δf использовался опорный генератор 5. Сигналы с кварцевого и опорного генераторов подавались на вход смесителя 6, разностный сигнал с которого с частотой Δf фиксировался частотомером 7.

Анализируемая жидкость (питьевая вода) наносилась малой калиброванной каплей массой $m_0 = 11,5 \pm 0,5$ мг на поверхность резонатора в его центральную часть шприцом с помощью капил-

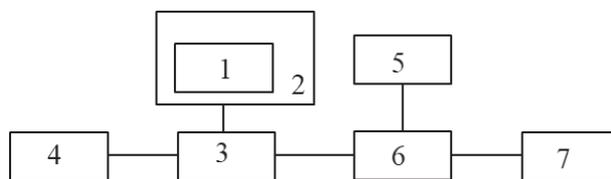


Рис. 1. Блок-схема измерительного модуля для экспресс-анализа сухого остатка воды
1 — кварцевый резонатор;
2 — измерительная ячейка;
3 — кварцевый генератор;
4 — источник постоянного тока;
5 — опорный генератор;
6 — смеситель; 7 — частотомер

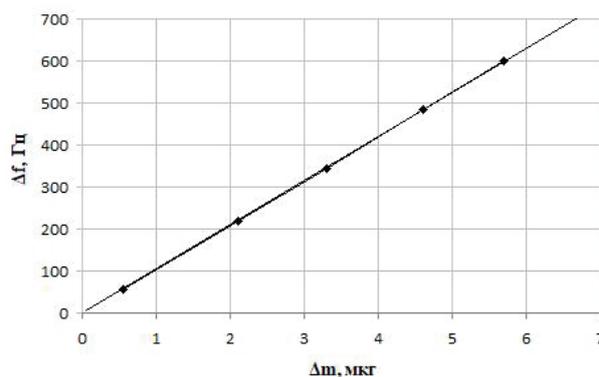


Рис. 2. Калибровочный график зависимости Δf от Δm

лярной иглы. В течение нескольких минут вода испарялась, и сухой остаток локализовался в виде пятна определенного размера. Частота генератора уменьшалась до значения f . Когда значение частоты стабилизировалось, выполнялись дальнейшие измерения. Погрешность измерения частоты составляла ± 1 Гц. Ее изменение определялось как разность частот $\Delta f = f_0 - f$. Это значение можно связать с массой Δm сухого остатка жидкости, оставшегося после ее испарения на поверхности резонатора.

Если эта масса распределена на поверхности равномерно, то ее величину можно определить с помощью выражения (1). Опыт показывает, что при испарении воды слой сухого остатка образуется с различной толщиной в разных его местах. Поэтому соотношение (1) в данном случае использовать не рекомендуется [11]. Следовательно, для получения корректных результатов связь между Δm и Δf необходимо определять опытным путем. Экспериментальная зависимость, как следует из теории, должна быть линейной. В данной работе опытным путем исследовалась калибровочная зависимость:

$$\Delta m = C_t \cdot \Delta f, \quad (2)$$

где C_t — массочувствительный коэффициент микровесов. Значение этого параметра определяется в результате анализа опытных данных. Для проведения калибровочного эксперимента использовался водный раствор NaCl. График зависимости (2) представлен на рис. 2. Для заданных условий эксперимента (температура 20 °С, давление 105 Па) мас-

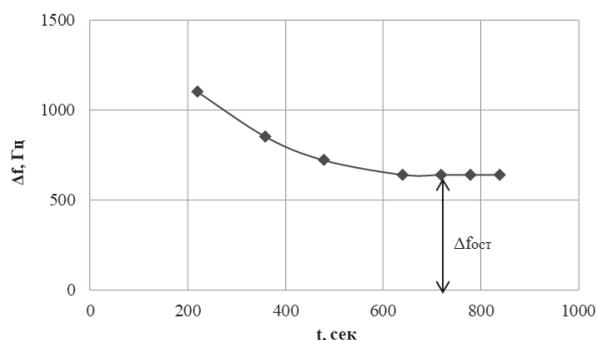


Рис. 3. Зависимость Δf от времени испарения t капли водопроводной воды

Таблица 1

Величина сухого остатка для различных образцов питьевой воды

№ образца	Δf , Гц	Δm , мкг	X , мг/л
1	640	6,11	530
2	520	4,94	430
3	200	1,90	219
4	80	0,76	66

сочувствительный коэффициент микровесов равен $C_r = (9,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-9}$ г/Гц.

После нанесения капли воды на поверхность резонатора происходит ее испарение и фиксируется уменьшение значения разности частот Δf . Этот процесс показан на рис. 3.

Испарение воды происходит в течение нескольких минут, и разность частот перестает изменяться. Это значение $\Delta f_{ост}$ определяет сухой остаток воды, масса которого рассчитывается с помощью соотношения (2). Температура среды, в которой находится пьезокварцевый резонатор, влияет на значение частоты измерительного генератора. Для резонаторов АТ среза температурный коэффициент частоты в интервале 20–30 °С близок к нулю. Поэтому значение $\Delta f_{ост}$ определялось при температуре 20 °С.

Экспериментальные результаты и их анализ. Для оценки возможности практического использования метода пьезокварцевого микровзвешивания были выполнены измерения содержания сухого остатка в различных образцах питьевой воды. Образец 1 — водопроводная вода, которая набиралась в лаборатории из крана. Образец 2 — водопроводная вода, прошедшая очистку бытовым фильтром типа «Барьер». Образец 3 — очищенная бытовым фильтром и прокипяченная вода. Образец 4 — дистиллированная вода. Полученные результаты представлены в табл. 1. На основании опытных данных был рассчитан параметр X , который характеризует массу сухого остатка в литре воды. Погрешность определения этого параметра составляла около 8 %.

Анализ данных, полученных методом пьезокварцевого микровзвешивания, позволяет утверждать (по значению параметра X), что питьевую воду в водопроводе г. Сургута можно отнести к оптимально минерализованной (300–500 мг/л). Фильтр убира-

ет из воды часть примесей, уменьшая массу сухого остатка, но вода остается оптимально минерализованной. При кипячении часть веществ выпадает в осадок, а ее минерализация становится удовлетворительной (100–300 мг/л). Дистилляция выводит из воды большое количество растворенных в ней веществ и вода становится слабоминерализованной (50–100 мг/л).

При постановке эксперимента не полностью выполнялись жесткие условия стандартного гравиметрического метода, в котором получение и обработка сухого остатка происходит в несколько этапов. Например, в этом методе предусмотрена просушка сухого остатка при 100–120 °С, что приводит к улетучиванию различных органических соединений и уменьшению его массы [2]. Поэтому, сравнивать полученные гравиметрическим методом данные с результатами настоящей работы необходимо с учетом этих условий.

Заключение. Гравиметрический метод определения сухого остатка воды, являясь точным и надежным методом, широко используется при проведении наиболее ответственных и требующих точности аналитических работах. Но аналитический процесс является трудоемким и длительным.

Кроме этого, метод обладает невысокой чувствительностью. Этих недостатков лишен метод пьезокварцевого микровзвешивания. Результаты данной работы позволяют утверждать, что метод пьезокварцевого микровзвешивания можно использовать для определения сухого остатка воды. Данная методика предлагается для экспресс-анализа качества питьевой воды в различных технологических процессах.

Библиографический список

- Муравьев А. Г. Руководство по определению показателей качества воды полевыми методами. СПб.: Кримас+, 2004. 146 с.
- ГОСТ 18164-72. Вода питьевая. Метод определения содержания сухого остатка. Контроль качества воды. М.: Стандартинформ, 2010. 25 с.
- Радион Е. В. Классические методы анализа: практическое применение. Минск: Изд-во БГТУ, 2013. 76 с.
- Заводовский А. Г., Заводовская О. В. Определение сухого остатка жидкости методом пьезокварцевого микровзвешивания // Новые информационные технологии и менеджмент качества: Междунар. форум, 28 марта–4 апреля 2009 г. Египет, Шарм-эль-Шейх, 2009. С. 172–174.
- Малов В. В. Пьезорезонансные датчики. М.: Энергоатомиздат, 1989. 272 с.
- Sauerbrey G. G. Verwendung von Schwingquarzen zur Wagung dünner Schichten und zur Mikrowagung // Zeitschrift für Physik a Hadrons and Nuclei. 1959. Bd. 155. S. 206–221. DOI: 10.1007/BF01337937U.
- Альтшулер Г. Б., Елфимов Н. Н., Шакулин В. Г. Кварцевые генераторы. Справочное пособие. М.: Радио и связь, 1984. 232 с.
- Заводовский А. Г., Заводовская О. В. Ледообразование из пара на охлаждаемой подложке в атмосфере фреона // Сб. науч. тр. СурГУ. Сургут: Изд-во СурГУ, 1996. Вып. 2. С. 87–89.
- Заводовский А. Г., Заводовская О. В. Экспериментальные исследования адсорбции углеводородных компонент в пластовых условиях // Сб. науч. тр. СурГУ. Сургут: Изд-во СурГУ, 1995. Вып. 1. С. 137–145.
- Милонов М. В. Разработка системы измерений концентраций химических соединений в жидкости массочувствительными пьезокварцевыми сенсорами: дис. ... канд. техн. наук. Липецк, 2004. 128 с.

11. Николаев В. Т. Микровесы с кварцевым резонатором в технологии микроэлектроники. Обзоры по электронной технике. М.: ЦНИИ Электроника, 1973. Вып. 1 (74). 30 с.

ЗАВОДОВСКИЙ Александр Геннадьевич, кандидат физико-математических наук, доцент (Россия), доцент кафедры экспериментальной физики.
SPIN-код: 7560-5363,
AuthorID (РИНЦ): 323507
Адрес для переписки: zavodovskiy_sgu@list.ru

Для цитирования

Заводовский А. Г. Определение сухого остатка питьевой воды методом пьезокварцевого микровзвешивания // Омский научный вестник. 2020. № 5 (173). С. 99–102. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-173-99-102.

Статья поступила в редакцию 02.09.2020 г.
© А. Г. Заводовский