

5. Gusev A.V. Obzor rynka kompleksnykh meditsinskikh informatsionnykh sistem [Market review complex medical information systems], *Vrach i informatsionnye tekhnologii* [The doctor and information technology], 2009, No. 6, pp. 4-17.
6. Knyazyuk N.F., Kitsul I.S. Proektirovanie sistemy menedzhmenta riskov informatsionnoy bezopasnosti na osnove trebovaniy mezhdunarodnogo standarta ISO/IEC 27005:2011 [Design management system information security risks based on the requirements of international standard ISO/IEC 27005:2011], *Vrach i informatsionnye tekhnologii* [The doctor and information technology], 2012, No. 1, pp. 39-47.
7. Kozadov Yu.V. Issledovanie tipovykh protsessov integratsii v meditsinskikh informatsionnykh sistemakh [Study of typical processes of integration in health information systems], *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2009, No. 2, pp. 55.
8. Kosmacheva I.M. Analiz problemy effektivnoy organizatsii kontrolya za deystviyami pol'zovateley v meditsinskikh informatsionnykh sistemakh [The analysis of the problem of effective control over the actions of users in medical information systems], *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Astrakhan state technical University], 2008, No. 1, pp. 74-76.
9. Mukhin Yu.Yu., Lebedev G.S. Podkhody k parametricheskoy otsenke i sopostavleniyu funktsiy meditsinskikh informatsionnykh sistem [Approaches to parametric evaluation and comparison of functions of the medical information systems], *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* [Information-measuring and control systems], 2013, Vol. 11, No. 10, pp. 19-30.
10. Ponomareva M.G. Voprosy informatsionnoy bezopasnosti pri modernizatsii meditsinskikh informatsionnykh sistem [Information security issues when upgrading health information systems], *Nauchnye trudy Vol'nogo ekonomicheskogo obshchestva Rossii* [Scientific works of the Free economic society of Russia], 2013, Vol. 179, pp. 617-623.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Г.А. Попов.

Брумштейн Юрий Моисеевич – Астраханский государственный университет; e-mail: brum2003@mail.ru; 414040, г. Астрахань, пл. Карла Маркса, 21, кв. 34; тел.: 88512610843; кафедра управления качеством; к.т.н.; доцент.

Сивер Ольга Викторовна – e-mail: s_o_v69@mail.ru; 414057, г. Астрахань, ул. Кубанская, 5; тел.: 88512777588; магистрантка; начальник информационно-аналитического отдела НУЗ «МСЧ».

Brumshteyn Uuri Moiseevich – Astrakhan State University; e-mail: brum2003@mail.ru; 21, Square Karla Marksa, fl. 34, Astrakhan, 414040, Russia; phone: +78512610843; the department of quality control; cand. of eng. sc.; associate professor.

Siver Olga Viktorovna – e-mail: s_o_v69@mail.ru; 5, Kubanskaya street, Astrakhan, 414057, Russia; phone: +78512777588; magistrant; head of information and analysis department of NUZ "MSCh" (Astrakhan).

УДК 615.471:616-073.97:616.831:681.3.06

В.Ю. Вишневецкий, Т.П. Строчан

ВЫБОР МЕТОДА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ПЬЕЗОКВАРЦЕВОГО БИОСЕНСОРА

Автоматические методы химического анализа, тесно связаны со средствами аналитической и микропроцессорной техники. Приборы должны быть пригодны для автоматического выполнения важнейших стадий аналитического определения, в том числе и для большого объема измерений. Биосенсоры, представляют собой комбинацию селективного биохимического элемента с электронным датчиком, позволяют провести анализ воды в режиме реального времени и обнаружить различные загрязнители и их смеси, исключают

необходимость сложной подготовки проб. Необходимо выбрать универсальный метод для автоматического анализа, который отвечал бы предъявляемым требованиям для различных целей. Рассмотрены наиболее подходящие методы в соответствии с преобразователем (трансдюссером) пьезокварцевого биосенсора. Определение наиболее оптимального метода обеспечивает эффективную работу, более верный результат с наименьшей погрешностью. Благодаря этому в практической работе исчезают выполняющиеся вручную аналитические процедуры. Это сокращает время выполнения аналитических определений при улучшении качества получаемых результатов анализа.

Биосенсор; метод; мониторинг; пьезоэлемент; поллютант.

V.Yu. Vishnevetsky, T.P. Strochan

CHOICE OF METHOD FOR THE EXPERIMENT PIEZOELECTRIC BIOSENSORS

Automatic methods of chemical analysis are closely associated with the analytical tools and microprocessor technology. Devices must be suitable for the automatic execution of the most important analytical determination stages, including a large volume measurements. Biosensors are selective biochemical sequence element with electronic sensor, allow for water analysis in real time and detect the various pollutants and their mixtures, eliminate the complex sample preparation need. It is necessary to select a versatile method for the automatic analysis, which would meet the requirements for different purposes. The most appropriate methods in accordance with the converter (transducer) piezoelectric biosensor are considered. Determining the best method ensure efficient work, more accurate result with the least error. Thanks to this practical work is done manually fade analytical procedures. This reduces the execution time of analytical determinations at improving the quality of the analysis results.

Biosensor method; monitoring; piezo; pollutant.

В химии и медицине часто приходится выполнять большое число отдельных определений загрязняющих веществ в водной среде, в клинических лабораториях, при выполнении биохимических исследований. Большую роль здесь призваны сыграть автоматические методы анализа, использующие современную идеологию и средства аналитической и микропроцессорной техники. Для обработки больших массивов исходных данных удобно использовать соответствующую микропроцессорную технику – в современных приборах компьютер составляет часть прибора. Такие приборы должны быть пригодны для автоматического выполнения важнейших стадий аналитического определения: отбор пробы, перевод ее в форму, удобную для проведения анализа, – в раствор, проведение аналитической реакции, измерение количества продукта этой реакции. Необходимо выбрать универсальный метод для автоматического анализа, который отвечал бы предъявляемым требованиям для различных видов анализируемых растворов [1].

Эти вопросы в существующей литературе по отношению к пьезокварцевым биосенсорам проанализированы недостаточно полно. Ставилась цель подобрать из всех существующих методов проведения измерений наиболее эффективный для пьезокварцевого биосенсора.

В основе большинства официальных методов контроля, используемых как в нашей стране, так и за рубежом, лежит принцип целевого определения конкретных веществ или групп соединений. При осуществлении аналитического мониторинга такой подход является недостаточным. Водные объекты (вода из водоисточников, вода питьевая, расфасованная, или вода, обработанная различными технологиями водоподготовки) нередко представляют собой с точки зрения химико-аналитического исследования объект неизвестного состава, когда можно ожидать присутствия любых

соединений. Поэтому возникает необходимость перехода при гигиенической оценке качества и безопасности воды или при оценке безопасности и эффективности технологий водоподготовки, основанных на определении малого количества конкретных показателей, к оценке с учетом компонентного состава соединений, реально содержащихся или образующихся в результате процессов обеззараживания или очистки.

Для объяснения принципа действия биосенсоров часто используют схему, представленную на (рис. 1). Она достаточно универсальна и применима к любым типам сенсоров, в которых реагент обладает сродством к индивидуальному веществу. Для иллюстрации высокоселективных реакций, протекающих между биологическими молекулами, предложен механизм, получивший название «ключ-замок». В биосенсорах «узнающим» реагентом обычно является макромолекула, иммобилизованная внутри мембраны, либо химически связанная с поверхностью, которая контактирует с раствором определяемого вещества. Между реагентом и определяемым веществом проходит специфическая химическая реакция. Это может быть либо прямое взаимодействие реагента с определяемым веществом, как в случае реакции антиген/антитело, либо каталитическое взаимодействие иммобилизованного фермента с определяемым веществом с образованием легко определяемого продукта. Очевидно, что измерение показателей состава и свойств воды в системах экологического контроля должно опираться на количественные показатели, являющиеся основанием для определения соответствия качества воды требованиям тех или иных ее «пользователей», включая обитателей водных объектов.

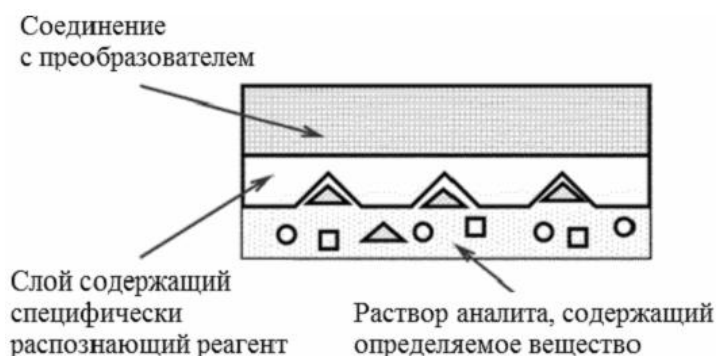


Рис. 1. Принцип работы биосенсора

Проблема контроля качества воды усложняется процессами трансформации, протекающими на разных стадиях водоподготовки и приводящими к образованию нередко более токсичных или опасных веществ, чем исходные соединения. Так, известно, что хлорирование воды вызывает образование токсичных и опасных продуктов – галогенсодержащих соединений, некоторые из которых проявляют также и канцерогенные свойства. Для исследования воды, предназначенной для применения в различных целях, необходимо разрабатывать системы с разной чувствительностью к загрязнителям. Это, в свою очередь, ставит задачу рационального выбора биосенсоров с совокупностями необходимых и достаточных характеристик. Эффективность биосенсора определяется его аналитическими характеристиками. Последние включают свойства измеряемого сигнала (величина и время отклика) в ответ на добавление анализируемого (определяемого) вещества, обратимость системы после удаления этого вещества, стабильность датчика и др. [2].

Существуют два подхода к автоматизации аналитических определений в растворах. Реализуя первый, стремятся создать автоматический анализатор, который бы полностью или частично выполнял обычные аналитические работы.

Второй, принципиально иной подход, основан на идее непрерывного анализа. Здесь анализируемый раствор непрерывно перемещается с помощью перистальтического насоса по жидкостным коммуникациям прибора – чаще всего это просто система стеклянных или пластиковых трубок.

Метод необходимо выбирать в зависимости от типа преобразователя биосенсора, для обеспечения максимально комфортных условий его работы, от чего, в свою очередь зависит точность проведенных измерений. К примеру, если биосенсор химического типа то, ему необходимо время в статическом состоянии с исследуемой жидкостью для протекания химической реакции, что, касается пьезокварцевого биосенсора то, он в свою очередь способен производить выборку измерений за короткий промежуток времени, а, следовательно, работать в динамике с жидкостью.

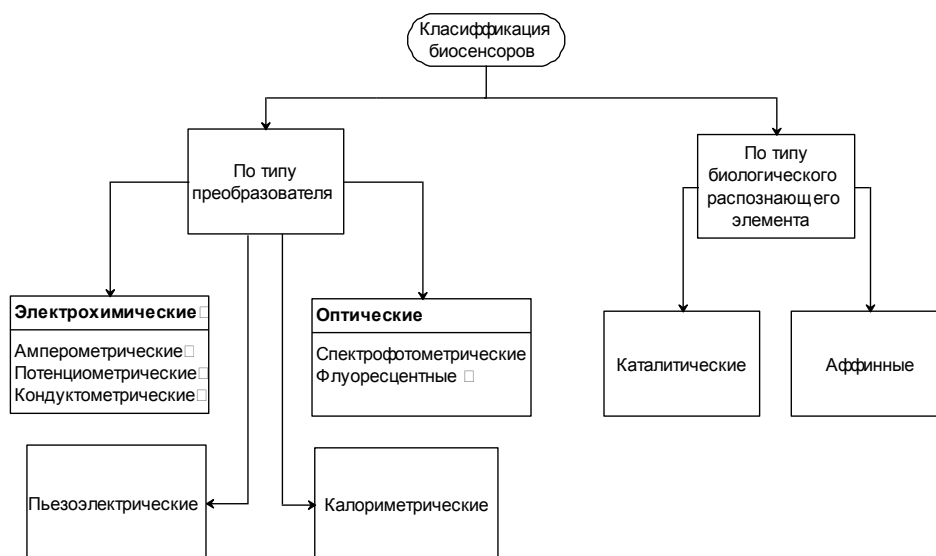


Рис. 2. Классификация биосенсоров

На рис. 2 представлена классификация биосенсоров по нескольким основным характеристическим признакам.

Пьезокварцевые биосенсоры могут применяться для анализа водных растворов в достаточно широком диапазоне концентраций [3].

В химически чувствительном слое происходит «узнавание» биоэлементом специфического для него вещества из многокомпонентной смеси. Исследуемое вещество сорбируется на рецепторный слой, тем самым изменяя массу пьезоэлемента.

Чувствительный слой связан с преобразователем, поскольку аналитический сигнал (Δf) рассчитывается как разность частот колебаний сенсора в начале измерения и в момент установления равновесия. За счет того, что пластина вырезана из кристалла кварца под определенным углом, она совершает так называемые сдвиговые колебания, как бы покачиваясь из стороны в сторону. При определенной частоте переменного напряжения в такой колебательной системе наступает резонанс.

нанс. При осаждении вещества на поверхности этого устройства происходит понижение резонансной частоты пластины. Масса осажденного вещества связана с изменением резонансной частоты соотношением Зауэрбрея: [4]

$$C = \frac{A \sqrt{\rho_{кв} \mu_{кв}}}{2f_0^2}, \quad (1)$$

где A – площадь пластины, $\rho_{кв}$ – плотность кварца, $\mu_{кв}$ – сдвиговый модуль упругости кварца, f_0 – исходная частота резонанса.

Далее биосенсор подключают к колебательному контуру, который в свою очередь калибрует ноль.

Можно сделать вывод, что, так же как и сами биосенсоры, методы будут различаться по статическому и динамическому признаку пробы по отношению к трансдьюсеру (рис. 3).

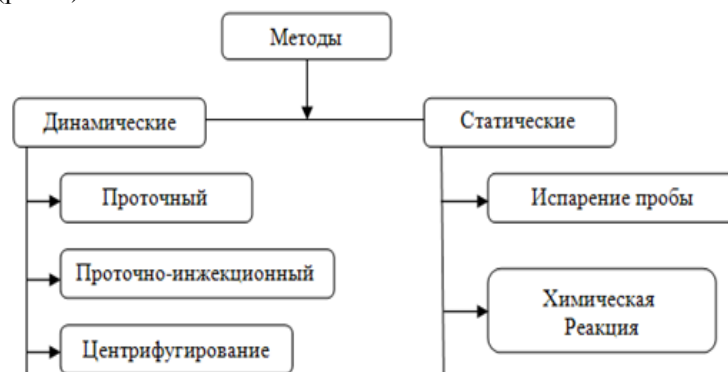


Рис. 3. Классификация методов по динамическому признаку пробы

Преобразователи (сенсоры) позволяют получать, регистрировать, обрабатывать и предавать информацию о состоянии различных систем. Это может быть информация о физическом строении, химическом составе, форме, положении и динамике исследуемой системы. Существуют различные типы преобразователей. Принципы их действия базируются на определенных физических или химических явлениях и свойствах. При систематизации датчиков часто рассматривают принцип их действия, который может быть обусловлен физическими или химическими явлениями и свойствами [5].

Пьезокварцевый биосенсор обладает преобразователем механического типа, следовательно, способен обрабатывать информацию в режиме реального времени с минимальными задержками по временной шкале. Так как статические методы требуют большего времени при измерениях, то они являются менее эффективными. Следовательно, для создания системы, работающей в коротком временном интервале с практически мгновенным откликом, рассмотрим динамические методы. Из этой группы выделим наиболее подходящие для пьезокварцевого биосенсора. Центрифугирование, как правило, дорогостоящий метод, а так же его сложность в подвижности корпуса по отношению к преобразователю, который и без того является хрупким элементом измерительной системы, – не рассматривается. Остаются два метода проточный и проточно-инжекционный [6].

Проточный метод основан на неразрывном, несегментированном, ламинарном потоке носителя, содержащего поллютант. При таком проведении эксперимента получим выборку данных или массив результатов отклика биосенсора на поток (рис. 4).

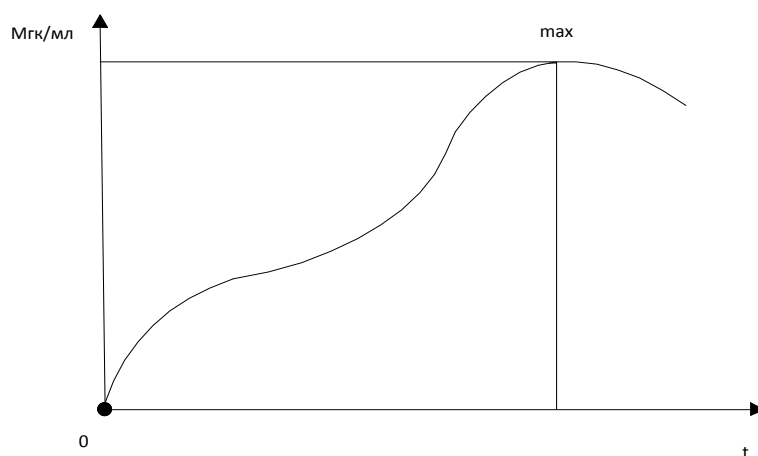


Рис. 4. Массив измерительных результатов пьезокварцевого биосенсора, полученный проточным методом

Из рис. 4 видно, что такой массив обладает максимумом, который и будет результатом измерения. Как правило, это несет дополнительные погрешности в измерительную систему, так как поллютант может быть не размешан в растворе или его распределение по пробе неравномерно. Это в свою очередь, определяет максимум массива, которых может быть несколько за единичное измерение.

Проточно-инжекционный метод основан на вводе (инъекции) небольшого объема пробы в создаваемый перистальтическим насосом поток носителя, содержащего необходимые для протекания аналитической реакции реагенты.

Этот способ оказался более перспективным, он поддается автоматизации и широко используется.

Инжектированный образец образует в потоке носителя некую окрашенную зону, границы которой контролируются в основном диффузией. Времени для этого достаточно, поскольку зона образца проходит смесительную спираль анализатора. Это приводит к некоторому размыванию или, как говорят химики-аналитики, дисперсии пробы. Детектор, в который далее поступает зона образца, содержащая уже продукт реакции, непрерывно регистрирует свойство продукта реакции.

Результат одного цикла анализа регистрируется самописцем в виде характерного острого пика, так как объем детектора мал, обычно ~ 10 мкл. Высота пика пропорциональна концентрации определяемого элемента в пробе. Сканирование одного пика занимает всего несколько секунд, реже минуту. Следовательно, не составляет проблем проанализировать 120–200 проб за 1 час. Отметим, что это обычная стандартная производительность (в других методах анализа растворов этого достигнуть невозможно) [7].

Если объемную скорость носителя поддерживать постоянной, чего нетрудно добиться используя так называемые перистальтические насосы, то время нахождения пробы в проточной системе, т.е. в сущности время протекания реакции, и в детекторе будет для всех проб практически одним и тем же – хорошо воспроизводимым – от образца к образцу. Поэтому все сигналы будут измеряться при одних и тех же условиях. Это гарантирует хорошую воспроизводимость регистрируемых пиков и, следовательно, получаемых далее аналитических результатов (рис. 5).

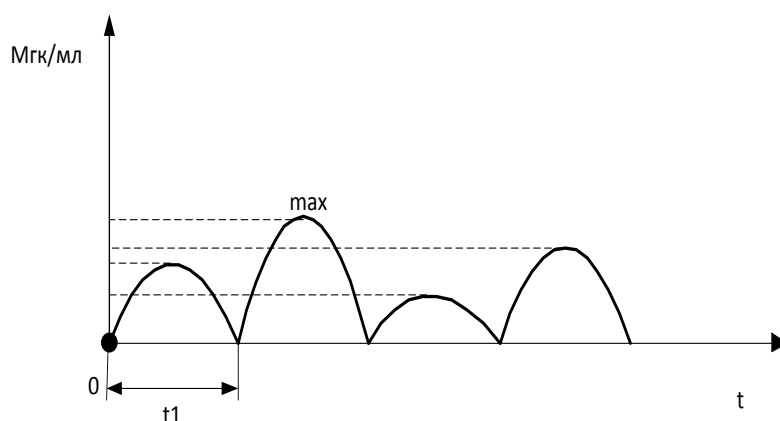


Рис. 5. Выборка измерительных результатов пьезокварцевого биосенсора, полученная проточно-инжекционным методом, где t_1 это интервал времени единичного измерения

Вводя поочередно в анализатор серию растворов с известной переменной концентрацией определяемого элемента, можно построить градуировочную шкалу. Далее, используя ее, анализируют реальные пробы. Для создания потока носителя используют исключительно перистальтические насосы, что позволяет разрабатывать различные конфигурации проточных систем [8].

Для проточно-инжекционного анализа (ПИА) характерна строгая воспроизводимость условий выполнения измерений – время нахождения пробы в проточной системе и постоянство гидродинамических условий в детекторе, что гарантирует хорошую воспроизводимость аналитических результатов.

Относительное стандартное отклонение (отношение случайной погрешности результата к среднему арифметическому) здесь составляет не более 0,005 (доли процента от измеряемой величины).

Поскольку условия работы поддерживаются строго постоянными как для стандартов, так и для проб (температура и явление дисперсии постоянны), достигается уникальная воспроизводимость в измерении сигналов.

Конечно, при введении пробы в поток носителя происходит ее физическое разбавление, которое количественно характеризуют коэффициентом дисперсии. Если бы дисперсии не было, детектор зарегистрировал бы прямоугольный пик.

Поскольку это не так, регистрируемый пик размывается и на практике регистрируется некая несимметричная кривая с максимумом. Коэффициент дисперсии D может быть рассчитан по формуле

$$D = C_0 / C_{\max},$$

где C_0 и C_{\max} – концентрации, отвечающие начальной в пробе и максимальной реальной, зарегистрированной детектором. Типичное значение коэффициента дисперсии в реальных системах 3–10. Это отвечает средним значениям D .

Подчеркнем совместное воздействие на коэффициент дисперсии физического разбавления и скорости протекания химической реакции в системе, что приводит к уменьшению высоты пика. Поэтому важно отметить, что коэффициент дисперсии зависит от таких факторов, как объем вводимой пробы, геометрия и конфигурация проточной системы, длина и внутренний диаметр смесительной спирали, объемная скорость потока [9].

При проточно-инжекционном методе мы фактически повторяем проточный только многократно, что приводит к более точному, усредненному показателю количества вещества в пробе. Благодаря этому в практической работе исчезают многие выполняющиеся вручную аналитические процедуры. Это сокращает время выполнения аналитических определений при улучшении качества получаемых результатов анализа.

Очевидно, что измерение показателей состава и свойств воды в системах экологического контроля должно опираться на количественные показатели, являющиеся основанием для определения соответствия качества воды требованиям тех или иных ее «пользователей», включая обитателей водных объектов.

Предельно допустимая концентрация (ПДК) – утверждённый в законодательном порядке санитарно-гигиенический норматив. Под ПДК понимается такая концентрация химических элементов и их соединений в окружающей среде, которая при повседневном влиянии в течение длительного времени на организм человека не вызывает патологических изменений или заболеваний, устанавливаемых современными методами исследований в любые сроки жизни настоящего и последующего поколений.

Требования к качеству воды могут предъявляться различные. И не только в отношении питьевого водоснабжения. Например, для рыбохозяйственных целей, гидрохимические параметры также нормируются, причем по большой номенклатуре показателей, и имеют более жесткие требования.

Проблема контроля осложняется процессами трансформации, протекающими на разных стадиях водоподготовки и приводящими к образованию нередко более токсичных или опасных веществ, чем исходные соединения. [10]Так, известно, что хлорирование воды вызывает образование токсичных и опасных продуктов – галогенсодержащих соединений, некоторые из них проявляют также и канцерогенные свойства.

Для учета различных норм необходимо разрабатывать системы с различной чувствительностью к загрязнителям. При построении сложных биосенсорных систем ориентированных на выявление комплекса загрязнений, проточно-инжекционный метод сложен в обработке данных, так как измерения проводятся многократно по каждому исследуемому веществу, но благодаря возможности обработки получаемых результатов на компьютерах, блочному принципу конфигурирования проточных систем, возможности измерения интенсивности различных свойств продуктов аналитических реакций, предоставляет гибкие и широкие возможности. Следовательно, он будет наиболее оптимальным для пьезокварцевого биосенсора и обеспечит эффективную работу, более верный результат с наименьшей погрешностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кузнецов В.В.* Проточно-инжекционный анализ // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 11. – С. 56-60.
2. *Вишневецкий В.Ю., Строчан Т.П.* Имитационная модель кварцевого биосенсора для экологических исследований // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 2. <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1755>.
3. *Вишневецкий В.Ю., Старченко И.Б., Ледеява В.С., Строчан Т.П.* Моделирование биосенсоров для построения системы определения степени токсичности водной среды // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – № 3. – С. 129-139.
4. *Штигун Л.К.* Проточно-инжекционный анализ // Журнал аналитической химии. – 1990. – Т. 45, № 6. – С. 1045-1091.
5. *Егоров А.А.* Систематика, принципы работы и области применения датчиков // Журнал радиоэлектроники. – 2009. – № 3. – С. 35-46.

6. *Вишневецкий В.Ю., Строчан Т.П.* Биосенсор для мониторинга водной среды. Материалы Шестой Всероссийской научной конференции «Экология 2011-море и человек». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – С. 138-144.
7. *Van der Linden.* Classification and Definition of Analytical Methods Based on Flowing Media // *Pure and Appl. Chem.* – 1994. – Vol. 66, № 12. – P. 2494-2500.
8. *Ruzicka J., Elo H.* Hansen Flow injection analysis principles, applications and trends // *Chem. Papers.* – 1980. – Vol. 114, № 15. – P. 19-44.
9. *Trojanowicz M.* Flow Analysis as Advanced Branch of Flow Chemistry // *Mod Chem appl.* – 2013. – № 1. – С. 104. doi:10.4172/mca.1000104.
10. *Merlos Rodrigo M.A., Zitka O.* Analysis of Cadmium-Phytochelatin 2 Complexes Using Flow Injection Analysis Coupled with Electrochemical Detection Mass Spectrometry. *Sci.* 8. – 2013. – P. 4409-4421.

REFERENCES

1. *Kuznetsov V.V.* Protochno-inzheksionnyy analiz [Flow-injection analysis], *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal* [Soros educational journal], 1999, No. 11, pp. 56-60.
2. *Vishnevetskiy V.Yu., Strochan T.P.* Imitatsionnaya model' kvartsevoogo biosensora dlya ekologicheskikh issledovaniy [Simulation model quartz crystal biosensor for environmental studies], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2013, No. 2. Available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1755>.
3. *Vishnevetskiy V.Yu., Starchenko I.B., Ledyeva V.S., Strochan T.P.* Modelirovaniye biosensorov dlya postroeniya sistemy opredeleniya stepeni toksichnosti vodnoy sredy [Modeling of biosensors to build a system to determine the degree of toxicity of the aquatic environment], *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal Management and High Technologies], 2013, No. 3, pp. 129-139.
4. *Shpigun L.K.* Protochno-inzheksionnyy analiz [Flow-injection analysis], *Zhurnal analiticheskoy khimii* [Journal of analytical chemistry], 1990, Vol. 45, No. 6, pp. 1045-1091.
5. *Egorov A.A.* Sistematika, printsipy raboty i oblasti primeneniya datchikov [Systematics, principles and applications of sensors], *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2009, No. 3, pp. 35-46.
6. *Vishnevetskiy V.Yu., Strochan T.P.* Biosensor dlya monitoringa vodnoy sredy [Biosensor for monitoring the aquatic environment] *Materialy Shestoy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Ekologiya 2011-more i chelovek»* [The materials of the Sixth all-Russian scientific conference "Ecology 2011-the sea and people"]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2011, pp. 138-144.
7. *Van der Linden.* Classification and Definition of Analytical Methods Based on Flowing Media, *Pure and Appl. Chem.*, 1994, Vol. 66, No. 12, pp. 2494-2500.
8. *Ruzicka J., Elo H.* Hansen Flow injection analysis principles, applications and trends, *Chem. Papers*, 1980, Vol. 114, No. 15, pp. 19-44.
9. *Trojanowicz M.* Flow Analysis as Advanced Branch of Flow Chemistry, *Mod Chem appl.*, 2013, No. 1, pp. 104. doi:10.4172/mca.1000104.
10. *Merlos Rodrigo M.A., Zitka O.* Analysis of Cadmium-Phytochelatin 2 Complexes Using Flow Injection Analysis Coupled with Electrochemical Detection Mass Spectrometry. *Sci.* 8, 2013, pp. 4409-4421.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.П. Тарасов.

Вишневецкий Вячеслав Юрьевич – Южный федеральный университет; e-mail: vvu@fep.tti.sfedu.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: 88634371795; к.т.н.; доцент.

Строчан Тимур Петрович – e-mail: strochan.timur@rambler.ru; аспирант.

Vishnevetskiy Vyacheslav Yur'evich – Southern Federal University; e-mail: vvu@fep.tti.sfedu.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634371795; cand. of eng. sc.; associate professor.

Strochan Timur Petrovich – e-mail: strochan.timur@rambler.ru; postgraduate student.