

УДК 543.552.054.1+665.735.2
DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4200
Шифр специальности ВАК 1.4.6

Определение стабилизирующих добавок в керосинах методом мультисенсорной инверсионной вольтамперометрии

Е.М. Петренко[✉], В.А. Семенова

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Россия, г. Москва

[✉] lp-2002@mail.ru

Аннотация

Актуальность. Для обеспечения эксплуатационной надежности техники актуальной задачей является контроль содержания антиокислительных и противоизносных присадок в топливе для двигателей на всех этапах от его производства до применения по назначению. На этапах применения топлива (хранение, перекачка, транспортирование и т. д.) антиокислительные присадки могут расходоваться из-за естественных окислительных процессов, неизбежно происходящих в топливе, а противоизносные присадки, будучи по своей природе поверхностно-активными веществами, могут адсорбироваться на поверхностях технологического оборудования, с которым контактирует топливо. Вследствие этого на этапе применения по назначению уровень качества топлива может существенно снизиться. Контроль содержания присадок в топливе на этапе применения позволит принять своевременные меры по восстановлению качества топлива и снизить риски происшествий. **Цель:** предложить подход к анализу компонентного состава топлив, позволяющий осуществлять контроль содержания присадок. **Объекты:** керосиновые фракции, применяемые в качестве основы выпускаемых нефтеперерабатывающими предприятиями топлив марок ТС-1 и РТ, стабилизирующие противоизносные добавки «Хайтек» и ДНК (дистиллированные нефтяные кислоты). **Методы.** В рамках исследований, посвященных решению проблемы оперативного контроля содержания тех или иных присадок в различных нефтепродуктах, большое внимание было уделено возможности использования для этих целей методов вольтамперометрии. Вольтамперометрия представляет собой электрохимический метод анализа, основанный на закономерностях протекания электрического тока через электрохимическую ячейку – аналитическую систему из двух электродов, разделенных анализируемым раствором-электролитом. При этом информацию получают на основании изменения потенциала на индикаторном микроэлектроде, погруженном в анализируемый раствор. **Результаты.** Представлен подход к анализу компонентного состава топлив методом мультисенсорной инверсионной вольтамперометрии, позволяющий осуществлять контроль содержания присадок в топливе. Изучена особенность электрохимического поведения различных марок гидрогенизированных авиакеросинов с целью разработки мобильной экспресс-методики определения в них присадок. Разработана тест-система, состоящая из водного раствора диметилформамида (40 %) с хлористым калием (0,1 М), катионов кобальта, цинка и ртути ($2,5 \times 10^{-4}$ М). Анализируемое топливо вводилось в соотношении 30:1. Полученную смесь объемом 50 мкл перемешивали и помещали на индикаторный электрод для последующего проведения электрохимических измерений. Определение присадок в керосине в разработанной методике проводилось по изменению пиков токов растворения металлов тест-системы, при этом решалась не только задача определения наличия присадок в керосине, но и их идентификации.

Ключевые слова: Моторное топливо, керосиновая фракция, стабилизирующие противоизносные добавки, мультисенсорная инверсионная вольтамперометрия.

Для цитирования: Петренко Е.М., Семенова В.А. Определение стабилизирующих добавок в керосинах методом мультисенсорной инверсионной вольтамперометрии // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 12. – С. 189–195. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4200

UDC 543.552.054.1+665.735.2

DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4200

Determination of stabilizing additives in kerosenes by the multisensor stripping voltammetry method

E.M. Petrenko[✉], V.A. Semenova

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ lp-2002@mail.ru

Abstract

Relevance. To ensure the operational reliability of equipment, an urgent task is to control the content of antioxidant and antiwear additives in engine fuel at all stages from its production to its intended use. At the stages of fuel use (storage, transfer, transportation, etc.), antioxidant additives can be used up due to natural oxidative processes that inevitably occur in the fuel. As for the antiwear additives, being surfactants by their nature, they can be adsorbed on the surfaces of the process equipment with which the fuel comes into contact. As a result, at the stage of intended use, the level of fuel quality can significantly decrease. Controlling the content of additives in the fuel at the stage of application will allow taking timely measures to restore the fuel quality and reduce the risks of accidents. **Aim.** To propose an approach to the analysis of the component composition of fuels, which makes it possible to control the content of additives. **Objects.** Samples of kerosene fractions that are used as the basis or components of commercial fuels of the TC-1 and RT brands produced by oil refineries, stabilizing anti-wear additives "Hi-Tech" and distilled petroleum acids. **Methods.** In the framework of the research devoted to solving the problem of operational control of the content of certain additives in various petroleum products, much attention was paid to the possibility of using voltammetry methods for these purposes. Voltammetry is a set of electrochemical methods of research and analysis based on the patterns of electric current flow through an electrochemical cell – an analytical system of two electrodes separated by an analyzed electrolyte solution. Analytical information using voltammetric methods is obtained on the basis of studying the dependence of the current strength in an electrolytic cell on the potential of the indicator microelectrode immersed in the analyzed solution, on which the analyzed reaction proceeds. **Results.** The paper introduces an approach to the analysis of the component composition of fuels by the multisensor stripping voltammetry method. This approach makes it possible to control the content of additives in the fuel. A feature of the electrochemical behavior of various grades of hydrogenated jet fuel was studied in order to develop a mobile express method for determining additives in them. The authors have developed a test system consisting of an aqueous solution of dimethylformamide (40%) with potassium chloride (0.1 M), cobalt, zinc and mercury cations (2.5×10^{-4} M). The analyzed fuel was introduced in a ratio of 30:1. The resulting mixture, 50 μ l in volume, was mixed and applied to an indicator electrode for subsequent electrochemical measurements. The determination of additives in kerosene in the developed method was carried out by their influence on the peaks of the currents of dissolution of metals in the test system. In this case not only the task of determining the presence of additives in kerosene was solved, but also the problem of their identification.

Keywords: Motor fuel, kerosene fraction, stabilizing anti-export additives, multisensor stripping voltammetry.

For citation: Petrenko E.M., Semenova V.A. Determination of stabilizing additives in kerosenes by the multisensor stripping voltammetry method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 12, pp. 189–195. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4200

Введение

Расширение состава сырья и технологий переработки нефти приводит к расширению компонентного состава топлив [1–3] и увеличению выпуска топлив, содержащих от 50 до 95 % получаемых в процессе гидропереработки фракций. Это влечет за собой необходимость введения в них противоизносной и антиокислительной присадок [4–6]. Присадки вводятся в топливо на заводе-изготовителе в количестве, регламентируемом технологией их производства. На дальнейших этапах применения топлива (хранение, перекачка, транспортирование и т. д.) антиокис-

лительные присадки могут расходоваться из-за естественных окислительных процессов, неизбежно происходящих в топливе, а противоизносные присадки, будучи по своей природе поверхностно-активными веществами, могут адсорбироваться на поверхностях технологического оборудования, с которым контактирует топливо. Вследствие этого на этапе применения по назначению уровень качества топлива может существенно снизиться. Контроль содержания присадок в топливе на этапе применения позволит принять своевременные меры по восстановлению качества топлива и снизить риски происшествий.

В настоящее время применяются такие методы оценки свойств моторных и реактивных топлив, как ИК-Фурье спектроскопия, газовая и жидкостная хромато-масс-спектрометрия, титрование и др., являющиеся дорогостоящими, времязатратными, сложными в наладке и эксплуатации, требующими высокой квалификации оператора [7–10].

При решении задач идентификации органических веществ в последние годы используются мультисенсорные системы, позволяющие моделировать принципы обонятельных и вкусовых систем. Они определяются понятиями «Электронный нос» и «Электронный язык» [11, 12]. Принципиальным для устройств данного типа является то, что информация об анализируемом веществе выдается в виде образа N-мерной картины. К основным недостаткам этих систем можно отнести трудоемкость формирования единичных сенсоров и невысокую воспроизводимость их характеристик [13–16].

В основу нашей работы положен подход, позволяющий преодолеть недостатки известных мультисенсорных систем [17–20]. В качестве сенсоров используются не индикаторные электроды, а находящиеся в растворе электролита ионы металлов, способных образовывать комплексные соединения с органическими веществами, что приводит к изменению их электрохимической активности, которая фиксируется методом инверсионной вольтамперометрии. Таким образом, вся информация по параметрам каждого органического вещества получается на одном электроде.

Методика проведения анализа

Объектами исследований были выбраны керосиновые фракции, применяемые в товарных топливных марках ТС-1 и РТ в качестве основы или компонентов. Керосин, как продукт перегонки нефти, может иметь различные эксплуатационные и химико-физические характеристики, которые зависят от варианта переработки и состава используемой нефти. Изменение состава меняет характеристики, что отражается на его физических свойствах, определяющих возможности использования этого нефтепродукта для решения тех или иных задач. В работе нами исследовались прямогонные фракции керосина (сырье: смесь нефтей Западно-Сибирских и Волго-Уральских месторождений и смесь нефтей Западно-Сибирских, Урало-Поволжских и Ухтинского месторождений с вовлечением до 5 % Уренгойского газового конденсата), являющиеся сырьем для производства топливных марок ТС-1, а также гидроочищенная керосиновая фракция, применяемая в товарных топливных марках РТ. Обе они являются продуктами массового производства.

Для увеличения электропроводности керосина необходимо было найти растворитель, который образует с керосином однородный раствор и позволяет проводить измерения на планарных электродах в режиме инверсионной вольтамперометрии. С этой целью были изучены следующие растворители: диметилформамид, диметилсульфоксид, ацетон, ацетонитрил, этиловый спирт.

Результаты определения степени однородности смеси керосина и растворителей в соотношении 1:1 приведены в таблице.

Таблица. Влияние растворителей на степень однородности смеси с керосином

Table. Influence of solvents on homogeneity degree of the mixture with kerosene

Растворитель Solvent	Степень однородности смеси Mixture homogeneity degree
Диметилформамид Dimethylformamide	Однородна Homogeneous
Этиловый спирт Ethanol	Расслоение Bundle
Ацетонитрил Acetonitrile	
Диметилсульфоксид Dimethyl sulfoxide	
Ацетон Acetone	

Однородная смесь с керосином получается только в диметилформамиде (ДМФ), поэтому он был выбран при формировании тест-системы, состоящей из водного раствора диметилформамида (40 %) с хлористым калием (0,1 М), катионов кобальта, цинка и ртути ($2,5 \times 10^{-4}$ М). Анализируемое топливо вводилось в соотношении 30:1. Полученную смесь объемом 50 мкл перемешивали и помещали на индикаторный электрод для последующего проведения электрохимических измерений.

На электроосаждение металлов влияет потенциал электрода, при котором проходит процесс, его оптимальное значение зависит от среды (фона). В работе нами рассматривались потенциалы накопления (фн) –2,0, –1,85, –1,75, –1,65, –1,55 В. Наиболее выраженные пики токов растворения металлов в смеси керосина с ДМФ были получены при потенциале –1,75 В (относительно хлорсеребряного электрода).

На рис. 1 показаны вольтамперограммы, полученные при введении в фоновый раствор исследуемого керосина. Из рисунка видно, что на вольтамперограмме увеличиваются пики токов растворения металлов. Этот эффект можно связать с тем, что ионы металлов образуют комплексы, из которых электроосаждение металлов в присутствии керосина идет с большей скоростью.

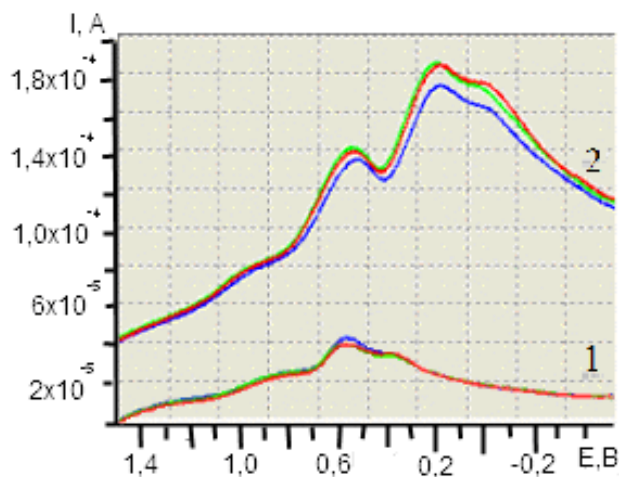


Рис. 1. Влияние керосина ТС-1 на вольтамперограмму токов тест-системы: 1 – тест-система, 2 – тест-система + исследуемый керосин

Fig. 1. Influence of kerosene TC-1 on the voltammogram of currents of the test system: 1 – test system, 2 – test system + test kerosene

Результаты и обсуждения

Для повышения противоизносных свойств в топливо добавляют специальные присадки. Для контроля качества необходимо определение компонентного состава топлива и содержания соответствующих присадок в нем. Одним из основных требований к присадке является то, что она вводится в малых концентрациях. Так, присадка «Хайтек» заметно отражается на характеристиках топлива уже в концентрациях равных 0,005 % (мас. доля). Методом мультисенсорной инверсионной вольтамперометрии нами была исследована возможность определения в керосинах РТ и ТС-1 стабилизиру-

ющих противоизносных добавок «Хайтек» и ДНК (дистиллированные нефтяные кислоты).

Для разработки условий обнаружения добавок «Хайтек» и ДНК в режиме инверсионной вольтамперометрии были исследованы растворы, в которых в качестве индикаторов их присутствия использовались различные сочетания катионов цинка, кадмия, свинца и кобальта. При этом важно отметить, что потенциалы растворения этих металлов заметно отличаются друг от друга. При электроосаждении металлов с поверхности электрода токи растворения имеют форму пиков. Потенциалы этих пиков являются определяющей характеристикой растворяющегося металла, а их амплитуда зависит от количества электроосажденного металла. Этот эффект можно связать с тем, что ионы металлов образуют с добавками комплексы, из которых электроосаждение металлов идет с большей скоростью, чем если бы этот процесс имел место в керосине. Этот эффект позволяет определять наличие добавки в керосине.

В качестве примера в статье представлены графические зависимости влияния добавок «Хайтек» и ДНК в концентрации 0,002 % на керосин марки ТС-1 (рис. 2, 3).

Из представленных зависимостей видно, что при введении в керосин ТС-1 добавок «Хайтек» и ДНК на вольтамперограмме увеличиваются пики токов растворения металлов. При введении в керосин ТС-1 добавки «Хайтек» ($C=0,002$ %) (рис. 2) – на 20 %, а при введении добавки ДНК ($C=0,002$ %) – на 30 % (рис. 3).

Также нами рассматривалось влияние одной и той же добавки на разные марки керосинов.

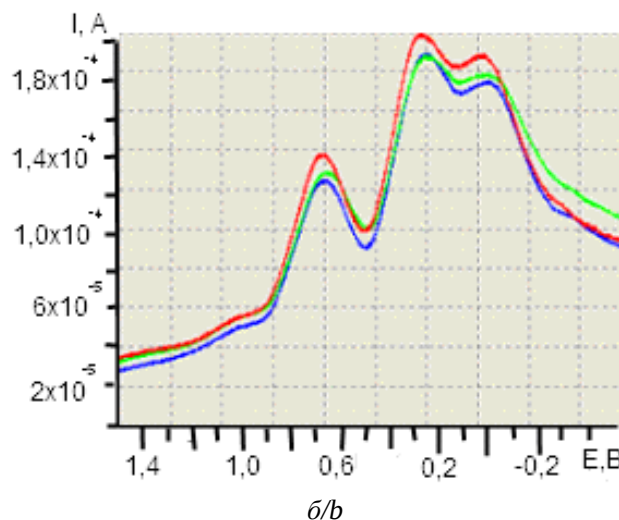
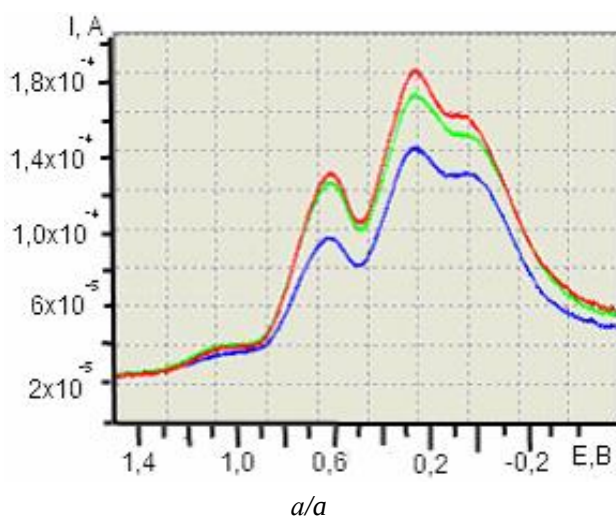


Рис. 2. Влияние добавки «Хайтек» ($C=0,002$ %) на керосин ТС-1: а) до; б) после

Fig. 2. Influence of additive "High-tech" ($C=0,002$ %) on kerosene TC-1: a) before; b) after

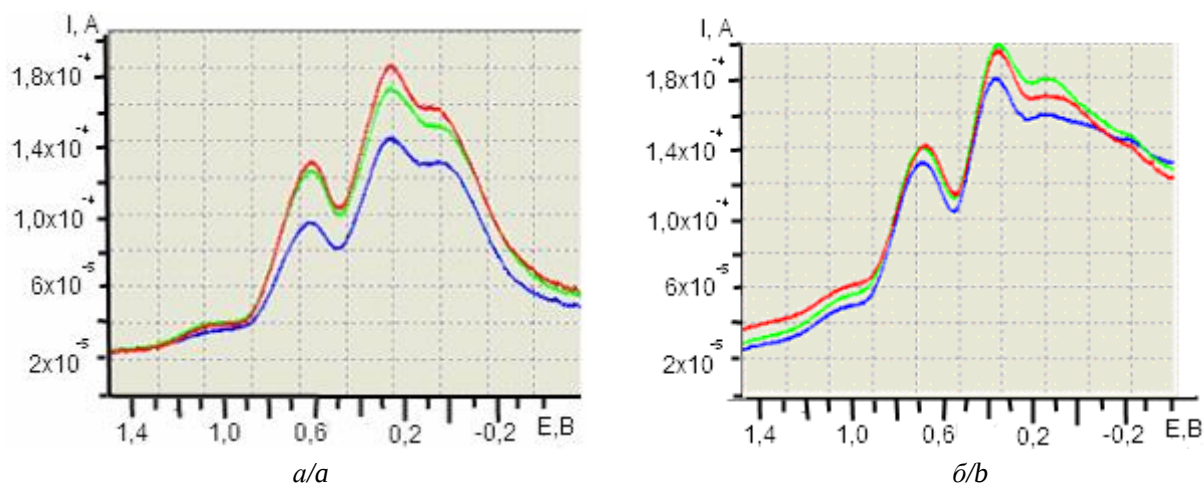


Рис. 3. Влияние добавки ДНК ($C=0,002\%$) на керосин ТС-1: а) до; б) после

Fig. 3. Influence of additive DPA (distilled petroleum acids) ($C=0,002\%$) on kerosene TC-1: a) before; b) after

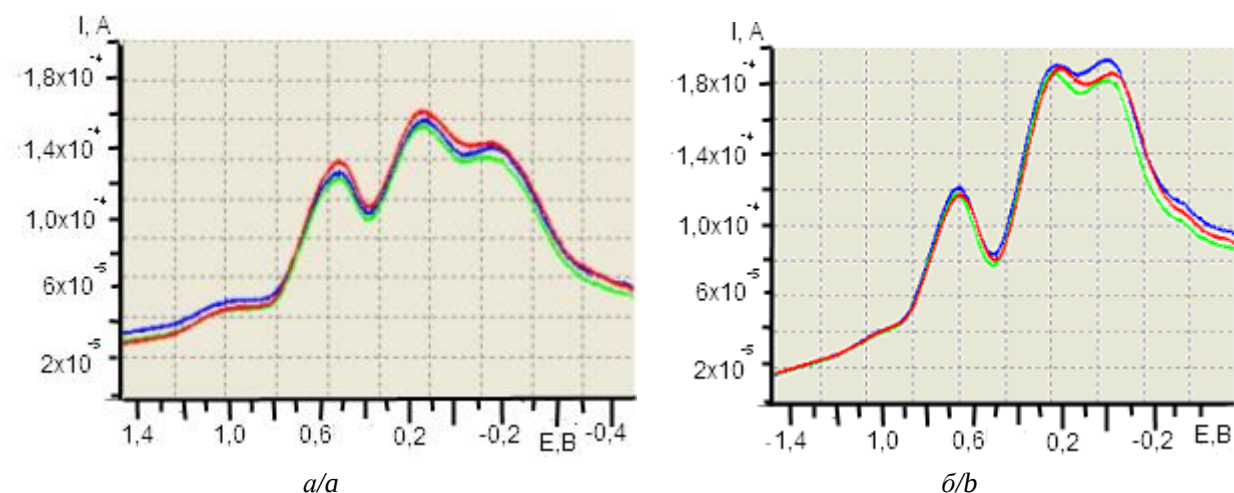


Рис. 4. Влияние добавки «Хайтек» ($C=0,002\%$) на керосин РТ: а) до; б) после

Fig. 4. Influence of additive "High-tech" ($C=0,002\%$) on kerosene RT: a) before; b) after

На рис. 4 представлена зависимость влияния добавки «Хайтек» на керосин марки РТ. Если сравнивать влияние этой же добавки на керосин ТС-1 (рис. 2), то можно заметить существенные различия в форме вольтамперограммы, полученной на разных керосинах, особенно это хорошо заметно по изменению пиков свинца и кобальта. Результаты оценки изменения вольтамперограммы тест-системы, содержащей керосиновые фракции топливных марок ТС-1 и РТ, при введении в них присадки «Хайтек» выглядят следующим образом. Введение добавки «Хайтек» ($C=0,002\%$) в топливную марку ТС-1 увеличивает пики токов вольтамперограммы на 20 %, тогда как ее введение в топливную марку РТ увеличивает пики токов на 40 %.

На основании проведенных в настоящей работе исследований может быть разработана экспресс-методика обнаружения и идентификации присадок в моторном топливе по их влиянию на токи раство-

рения электроосажденных металлов в режиме инверсионной вольтамперометрии.

Заключение

Представлен подход к анализу компонентного состава топлив методом мультисенсорной инверсионной вольтамперометрии, позволяющий осуществлять контроль содержания присадок в топливе. В разработанной методике определение и идентификация присадок в керосине осуществлялись по изменению токов растворения металлов тест-системы.

Разработанная методика обладает высокой оперативностью и малой трудоемкостью проведения анализа, что позволяет получать достоверные результаты не только в лабораторных, но и в полевых условиях. Это особенно актуально на этапе применения топлива для принятия своевременных мер по восстановлению его качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришин Д.Ф., Симанская К.Ю. Противоизносные и антиокислительные присадки к дизельным топливам с улучшенными экологическими характеристиками // *Экология и промышленность России*. – 2016. – Т. 20. – № 11. – С. 32–38.
2. Антиокислительные и противоизносные присадки к дизельным топливам глубокой гидроочистки с улучшенными экологическими свойствами / Н.Д. Зинина, В.Д. Зинин, А.А. Щепалов, Д.Ф. Гришин // *Технологии нефти и газа*. – 2013. – № 3 (86). – С. 9–12.
3. Feasibility of a nano-carbon black paste electrode for simultaneous voltammetric determination of antioxidants in food samples and biodiesel in the presence of surfactant / P.N. Angelis, J. de Cássia Mendonça, L.R. Rocha, T.B. Capelari, M.C. Prete, M.G. Segatelli, D. Borsato, C.R.T. Tarley // *Electroanalysis*. – 2020. – V. 32. – № 6. – P. 1198–1207.
4. Данилов А.М. Отечественные присадки к дизельным топливам // *Мир нефтепродуктов*. – 2010. – № 1. – С. 9–13.
5. Капустин В.М. Нефтяные и альтернативные топлива с присадками и добавками. – М.: КолосС, 2008. – 232 с.
6. Данилов А.М. Разработка и применение присадок к топливам в 2006–2010 гг. // *Химия и технология топлив и масел*. – 2011. – № 6. – С. 41–50.
7. Саблина З.А., Широкова Г.Б., Ермакова Т.И. Лабораторные методы оценки свойств моторных и реактивных топлив. – М.: Химия, 1978. – 240 с.
8. Чернышева А.В., Шарин Е.А., Щербakov П.Ю. Определение противоизносных присадок на основе жирных кислот в дизельных топливах методом ИК-спектроскопии // *Вестник НГИИЗ*. – 2019. – № 12 (103). – С. 46–55.
9. Волегова А.Ю., Глазкова М.С. Определение антиокислительной, противоизносной, цетаноповышающей и депрессорно-диспергирующей присадок в дизельном топливе методом ик-спектрометрии // *Нефтепереработка и нефтехимия*. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2019. – № 3. – С. 29–33.
10. Iodide determination with chalcogenide glass electrodes / U. Enseleit, C. Feller, U. Partsch, W. Vonau // *J. Solid State Electrochem.* – 2021. – V. 25 – P. 2293–2300.
11. Власов Ю.Г., Легин А.В., Рудницкая А.М. Электронный язык – система химических сенсоров для анализа водных сред // *Рос. Хим. Ж.* – 2008. – Т. 52. – № 2. – С. 101–112.
12. Chemical sensors and their systems / Yu.G. Vlasov, Yu.E. Ermolenko, A.V. Legin, A.M. Rudnitskaya, V.V. Kolodnikov // *Journal of Analytical Chemistry*. – 2010. – V. 65. – P. 880–898.
13. Designing and optimizing microsensor arrays for recognizing chemical hazards in complex environments / B. Raman, D.C. Meier, J.K. Evju, S. Semancik // *Sensors and Actuators B: Chem.* – 2009. – V. 137. – P. 617–629.
14. A colorimetric sensor array for identification of toxic gases below permissible exposure limits / L. Feng, C.J. Musto, J.W. Kemling, S.H. Lim, K.S. Suslick // *Chemical Communications*. – 2010. – V. 46. – P. 2037–2039.
15. Electrochemical sensor for determination of various phenolic compounds in wine samples using Fe₃O₄ nanoparticles modified carbon paste electrode / P.C. Pwovodi, V.H. Ozyurt, S. Asir, M. Ozsoz // *Micromachines*. – 2021. – V. 12. – № 3. – Article 312.
16. Carboxyl hydrogel particle film as a local pH buffer for voltammetric determination of luteolin and baicalein / Y. Ma, Y. Kong, J. Xu, Y. Deng, M. Lu, R. Yu, M. Yuan, T. Li, J. Wang // *Talanta*. – 2020. – V. 208. – Article 120373.
17. Идентификация алкалоидов методом инверсионной вольтамперометрии / В.П. Луковцев, А.Н. Доронин, Н.В. Луковцева, В.А. Семенова, В.М. Ганшин. // *Электрохимия*. – 2009. – Т. 45. – № 7. – С. 869–872.
18. Экспресс-скрининг биологических объектов методом мультисенсорной инверсионной вольтамперометрии с распознаванием образов / И.И. Колесниченко, А.Л. Ключев, В.М. Ганшин, Е.П. Кантаржи, А.Н. Доронин, В.П. Луковцев, В.Н. Андреев, В.В. Емец, В.А. Семенова // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. – 2014. – Т. 50. – № 4. – С. 440–444.
19. Halogen bonding ionophore for potentiometric iodide sensing / A.Y. Tan, Z.H. Neo, J.Y. Lim, S.S. Goh // *Anal. Chem.* – 2021. – V. 93. – P. 15543–15549.
20. Class-selective voltammetric determination of hydroxycinnamic acids structural analogs using a WS₂/catechin-capped AuNPs/carbon black-based nanocomposite sensor / F. Della Pelle, D. Rojas, F. Silveri, G. Ferraro, E. Fratini, A. Scroccarello, A. Escarpa, D. Compagnone // *Microchim. Acta*. – 2020. – V. 187. – № 5. – Article 296.

REFERENCES

1. Grishin D.F., Simanskaya K.Yu. Antiwear and antioxidant additives for diesel fuels with improved environmental characteristics. *Ecology and industry of Russia*, 2016, vol. 20, no. 11, pp. 32–38. In Rus.
2. Zinina N.D., Zinin V.D., Shchepalov A.A., Grishin D.F. Antioxidant and antiwear additives for deep hydrotreated diesel fuels with improved environmental properties. *Oil and Gas Technologies*, 2013, no. 3 (86), pp. 9–12. In Rus.
3. Angelis P.N., De Cássia Mendonça J., Rocha L.R., Capelari T.B., Prete M.C., Segatelli M.G., Borsato D., Tarley C.R.T. Feasibility of a nano-carbon black paste electrode for simultaneous voltammetric determination of antioxidants in food samples and biodiesel in the presence of surfactant. *Electroanalysis*, 2020, vol. 32, no. 6, pp. 1198–1207.
4. Danilov A.M. Domestic additives to diesel fuels. *World of oil products*, 2010, no. 1, pp. 9–13. In Rus.
5. Kapustin V.M. *Neftyanye i alternativnye topliva s prisadkami i dobavkami* [Petroleum and alternative fuels with additives and additives]. Moscow, Kolos Publ., 2008. 232p.
6. Danilov A.M. Development and application of additives to fuels in 2006–2010. *Chemistry and technology of fuels and oils*, 2011, no. 6, pp. 41–50. In Rus.
7. Sablina Z.A., Shirokova G.B., Ermakova T.I. *Laboratornye metody otsenki svoystv motornykh i reaktivnykh topliv* [Laboratory methods for assessing the properties of motor and jet fuels]. Moscow, Khimiya Publ., 1978. 240 p.
8. Chernysheva A.V., Sharin E.A., Shcherbakov P.Yu. Determination of anti-wear additives based on fatty acids in diesel fuels by IR spectroscopy. *Vestnik NGIIZ*, 2019, no. 12 (103), pp. 46–55. In Rus.

9. Volegova A.Yu., Glazkova M.S. Determination of antioxidant, antiwear, cetane-boosting and depressant-dispersant additives in diesel fuel by infrared spectrometry. *Oil refining and petrochemistry. Scientific and technical achievements and best practices*, 2019, no. 3, pp. 29–33.
10. Enseleit U., Feller C., Partsch U., Vonau W. Iodide determination with chalcogenide glass electrodes. *J. Solid State Electrochem*, 2021, vol. 25, pp. 2293–2300.
11. Vlasov Yu.G., Legin A.V., Rudnitskaya A.M. Electronic language – a system of chemical sensors for the analysis of aqueous media. *Ros. Chem. J.*, 2008, vol. 52, no. 2, pp. 101–112.
12. Vlasov Yu.G., Ermolenko Yu.E., Legin A.V., Rudnitskaya A.M., Kolodnikov V.V. Chemical sensors and their systems. *Journal of Analytical Chemistry*, 2010, vol. 65, pp. 880–898.
13. Raman B., Meier D.C., Evju J.K., Semancik S. Designing and optimizing microsensor arrays for recognizing chemical hazards in complex environments. *Sensors and Actuators B.: Chem.*, 2009, vol. 137, pp. 617–629.
14. Feng L., Musto C.J., Kemling J.W., Lim S.H., Suslick K.S. A colorimetric sensor array for identification of toxic gases below permissible exposure limits. *Chemical Communications*, 2010, vol. 46, pp. 2037–2039.
15. Pwavodi P.C., Ozyurt V.H., Asir S., Ozsoz M. Electrochemical sensor for determination of various phenolic compounds in wine samples using Fe₃O₄ nanoparticles modified carbon paste electrode. *Micromachines*, 2021, vol. 12, no. 3, Article 312.
16. Ma Y., Kong Y., Xu J., Deng Y., Lu M., Yu R., Yuan M., Li T., Wang J. Carboxyl hydrogel particle film as a local pH buffer for voltammetric determination of luteolin and baicalein. *Talanta*, 2020, vol. 208, Article 120373.
17. Lukovtsev V.P., Doronin A.N., Lukovtseva N.V., Semenova V.A., Ganshin V.M. Identification of alkaloids by stripping voltammetry. *Electrochemistry*, 2009, vol. 45, no. 7, pp. 869–872. In Rus.
18. Kolesnichenko I.I., Klyuev A.L., Ganshin V.M., Kantarzi E.P., Doronin A.N., Lukovtsev V.P., Andreev V.N., Emets V.V., Semenova V.A. Express screening of biological objects by multisensor stripping voltammetry with pattern recognition. *Physical chemistry of the surface and protection of materials*, 2014, vol. 50, no. 4, pp. 440–444. In Rus.
19. Tan A.Y., Neo Z.H., Lim J.Y., Goh S.S. Halogen bonding ionophore for potentiometric iodide sensing. *Anal. Chem.*, 2021, vol. 93, pp. 15543–15549.
20. Della Pelle F., Rojas D., Silveri F., Ferraro G., Fratini E., Scroccarello A., Escarpa A., Compagnone D. Class-selective voltammetric determination of hydroxycinnamic acids structural analogs using a WS₂/catechin-capped AuNPs/carbon black-based nanocomposite sensor. *Microchim. Acta*, 2020, vol. 187, no 5, Article 296.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Елена Михайловна Петренко, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2. lp-2002@mail.ru; orcid.org/0000-0002-0676-7304

Валентина Анатольевна Семенова, научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2. valentann@yandex.ru; orcid.org/0000-0002-9975-8035

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Elena M. Petrenko, Cand. Sc., Leading Researcher, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, 13, bld. 2, Izhorskaya street, Moscow, 125412, Russian Federation. lp-2002@mail.ru; orcid.org/0000-0002-0676-7304.

Valentina A. Semenova, Researcher, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, 13, bld. 2, Izhorskaya street, Moscow, 125412, Russian Federation. valentann@yandex.ru; orcid.org/0000-0002-9975-8035.

Поступила в редакцию: 19.04.2023

Поступила после рецензирования: 29.06.2023

Принята к публикации: 13.12.2023

Received: 19.04.2023

Revised: 29.06.2023

Accepted: 13.12.2023