

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНУЮ РЕАКЦИЮ ЛЮМИНОЛ–ПЕРОКСИД ВОДОРОДА

Д.А. Ибрагимова¹, О.М. Камиль¹, Т.В. Янькова^{2,@}, Н.А. Яштулов¹, Н.К. Зайцев¹

¹Московский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова), Москва 119571, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва 119991, Россия

@Автор для переписки, e-mail: yankovatatyana@yandex.ru

Хемилюминесцентная система люминол–пероксид водорода широко применяется в различных сферах: для создания диагностических систем, в химическом анализе, для исследования кинетики и механизма химических реакций, в качестве специальных и аварийных источников света, а также для наблюдения за живыми системами. Введение организованных молекулярных систем в реакционную смесь люминол–пероксид водорода может обеспечить возможность создания дополнительного канала управления хемилюминесцентными реакциями. В настоящей работе приведены ранее не описанные результаты исследования влияния катионных, анионных и неионогенных углеводородных поверхностно-активных веществ (бромид цетилтриметиламмония, децилсульфат натрия, додецилсульфат натрия, тритон X-100) и перфторированных поверхностно-активных веществ (FT-135 и FT-248) на хемилюминесцентные системы люминол–пероксид водорода–гексацианоферрат(III) калия и люминол–пероксид водорода–сульфат меди(II). Установлено, что они сохраняют способность к хемилюминесценции в присутствии ПАВ. Интенсивность хемилюминесценции в присутствии катионных ПАВ несколько падает, в то время как добавление анионных ПАВ ее усиливает. Независимо от выбранного катализатора, введение ПАВ позволяет увеличить диапазон линейности зависимости интенсивности хемилюминесценции от его концентрации. Получены кинетические кривые нарастания и затухания хемилюминесценции в вышеуказанных системах. Определены константы скорости затухания хемилюминесценции в рамках модели кинетики первого порядка.

Ключевые слова: хемилюминесценция, мицеллярные системы, люминол, пероксид водорода, поверхностно-активные вещества (ПАВ), катионные, анионные, неионогенные ПАВ, перфторированные ПАВ.

THE EFFECT OF SURFACTANTS ON THE CHEMILUMINESCENT REACTION OF LUMINOL WITH HYDROGEN PEROXIDE

D.A. Ibragimova¹, O.M. Kamil¹, T.V. Yankova^{2,@}, N.A. Yashtulov¹, N.K. Zaitsev¹

¹Moscow Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow 119571, Russia

²M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

@Corresponding author e-mail: yankovatatyana@yandex.ru

The luminol-hydrogen peroxide chemiluminescent system is widely used for the creation of diagnostic systems, for chemical analysis, for studying the kinetics and mechanisms of chemical reactions, for the creation of special and emergency light sources, and for monitoring living systems. However, the use of the luminol-hydrogen peroxide chemiluminescent system is limited by the fact that there are almost no ways of managing the reaction. The introduction of organized molecular systems into the luminol-hydrogen peroxide chemiluminescent system can create an additional channel for controlling chemiluminescent reactions. The luminol-hydrogen peroxide system was not previously studied in various classes of hydrocarbon and perfluorinated micellar solutions. This work was the first to study the effect of cationic, anionic and nonionic hydrocarbon

surface-active substances (cetyltrimethylammonium bromide, sodium decyl sulfate, sodium dodecyl sulfate, triton X 100) and perfluorinated surface-active substances (FT-135 and FT-248) on the chemiluminescent systems luminol-hydrogen peroxide-potassium hexacyanoferrate(III) and luminol-hydrogen peroxide-copper(II) sulphate. The systems retain the ability to chemiluminescence in the presence of a surfactant. Cationic surfactants lower the intensity of chemiluminescence, and anionic surfactants increase the intensity of chemiluminescence. The introduction of a surfactant into the system allows increasing the range of dependence of the chemiluminescence intensity on the catalyst concentration. Kinetic curves of the growth and decay of chemiluminescence were measured in the systems. The rate constants of the chemiluminescence decay were measured in the framework of the first-order kinetics model.

Keywords: chemiluminescence, micellar systems, luminol, hydrogen peroxide, cationic, anionic, nonanionic surface-active substances, perfluorinated surface-active substances.

Введение

Хемилюминесценция в настоящее время вызывает значительный интерес, обусловленный как чисто фундаментальными аспектами, так и возможностью практических приложений, в первую очередь, для создания новых средств диагностики [1, 2]. Хемилюминесцентные реакции широко используются в аналитических целях в промышленности, биологии, медицине, в области пищевого санитарного контроля [3, 4]. Исследователи имеют крайне ограниченные возможности управления хемилюминесцентными реакциями – практически только смешение реагентов и изменение температуры. Это препятствует созданию новых хемилюминесцентных диагностических систем с заданными свойствами, например, обладающих избирательностью действия. Таким образом разработка новых хемилюминесцентных диагностических систем является актуальной задачей.

Проведение хемилюминесцентных реакций в мицеллярной среде в принципе может дать следующие возможности управления хемилюминесцентными реакциями:

- ослабление влияния среды путем связывания (солюбилизации) мешающих компонентов аналитической матрицы или других примесей в гидрофобное ядро мицелл или с их концевыми группами (в том числе, имеется в виду разрушение клеточных мембран микроорганизмов);
- совмещение реагентов, растворимых в различных средах, возможность использовать в водном растворе компоненты, не растворимые в воде, например, активаторы хемилюминесценции (эффективно люминесцирующие вещества, способные служить акцепторами энергии электронного возбуждения для данной хемилюминесцентной реакции);
- разделение реагентов за счет эффекта компартиментализации, то есть исключение бимолекулярных процессов вследствие того, что в каждой мицелле оказывается не более одной молекулы реагента;
- управляемое разделение/соединение реагентов путем регулирования межфазной разностью потенциалов, существующей на границе мицелла/раствор;

- управляемое микроконцентрирование реагентов, продуктов и промежуточных соединений в мицеллярной фазе, создание высоких локальных концентраций реагентов и промежуточных соединений при обычных средних концентрациях реагентов в растворе.

В качестве модельной в настоящей работе выбрана реакция окисления гидразида 2-аминофталевой кислоты (далее люминола) пероксидом водорода. Хемилюминесцентные системы на основе люминола, обычно в сочетании с пероксидом водорода, изучены, по нашему мнению, наиболее подробно из всех известных хемилюминесцентных реакций и являются стандартными для проведения анализа различных веществ, например, остаточного активного хлора и АТФ [5]. Однако данная система, к сожалению, обладает высокой чувствительностью к микропримесям в матрицах различных анализируемых объектов, что отрицательно сказывается на воспроизводимости определений в практических условиях. Имеющиеся в литературе сведения о проведении хемилюминесцентных реакций в растворах мицеллообразующих поверхностно-активных веществ (ПАВ) носят отрывочный и неполный характер, хотя и свидетельствуют о влиянии на кинетику хемилюминесцентных реакций присутствия ПАВ. Так, Као, Вэнг и Лиу [6] использовали производное люминола L012 для определения активных форм кислорода в организме при диагностике таких заболеваний, как рак и ревматоидный артрит. L012 реагирует с активными формами кислорода, генерирует фотоны с длиной волны 460 нм, которые путем ферстеровского переноса энергии возбуждают люминесцентно-активные квантовые точки, обуславливающие усиление хемилюминесценции. С целью повышения стабильности квантовых точек путем предотвращения их коагуляции в систему вводили мицеллы. Люминесценция квантовых точек имеет максимум интенсивности при длине волны 800 нм, что позволяет излучению эффективно проходить через живые ткани и регистрироваться фотоприемником. Исследованы хемилюминесцентные

реакции окисления фталогидразидов – люминола и изолюминола – в присутствии природных циклодекстринов и некоторых ПАВ [7–9]. Установлено [7], что применение ПАВ (цетилтриметиламмоний бромид, ЦТАБ) приводит к стабилизации и усилению хемилюминесцентного сигнала в системе люминол–перманганат калия при определении L-тироксина. Авторы [7] полагают, что это обусловлено повышением растворимости L-тироксина и изменением диэлектрической проницаемости растворителя.

Изучена хемилюминесценция люминола, изолюминола и двух производных изолюминола в присутствии ионов кобальта(II) в циклодекстринах [8, 9]. По мнению авторов [8, 9], добавление циклодекстринов вызывает увеличение интенсивности хемилюминесценции вследствие стабилизации хемилюминесцентных молекул в гидрофобном ядре циклодекстринов. Продемонстрирована возможность определения с помощью хемилюминесцентной реакции люминол–пероксид водорода критической концентрации мицеллообразования (ККМ) ПАВ [10]. Замечено, что в точке ККМ наблюдается характерно выраженный эффект «разгорания» хемилюминесценции, природу которого авторам установить не удалось.

Следует заметить, что хемилюминесцентная реакция люминола с пероксидом водорода в присутствии ее типичных катализаторов гексацианоферрата(III) калия и сульфата меди(II) и с добавлением ПАВ, образующих мицеллы с различным знаком заряда, является наиболее изученной [11–16] и востребованной при проведении анализа на микробиологическую опасность [17–19].

Цель работы – определение закономерностей влияния мицеллярных растворов поверхностно-активных веществ различной природы на хемилюминесцентную систему люминол–пероксид водорода.

Экспериментальная часть

В качестве исходных реагентов в работе использовали: люминол (AppliChem, чистотой >95%); пероксид водорода (ХимМед, 32.5%-ный водный раствор); сульфат меди(II) 5-водный (ХимМед, «ч.д.а.»); гексацианоферрат(III) калия (ХимМед, «ч.»); додецилсульфат натрия (Sigma, 98.5%); цетилтриметиламмоний бромид (Sigma, 99%); Тритон X-100 (Panreac, «ч.»).

Эксперимент проводили следующим образом. Готовили смесь щелочного 0.1%-ного раствора люминола и 3%-ного водного раствора пероксида водорода в объемном соотношении 1:1 и выдерживали ее в течение 20 мин для насыщения раствора выделяющимся при смешении реагентов кислородом. Катионные, анионные и неионогенные углеводородные и перфторированные поверхностно-активные веще-

ства добавляли в концентрациях, соответствующих удвоенной критической концентрации мицеллообразования (ККМ) для каждого выбранного ПАВ. Далее 1 мл смеси помещали в фотоячейку хемилюминометра.

Для регистрации хемилюминесценции использовали хемилюминометр Эксперт-0010 (Эконикс-Эксперт, Россия). Фотоячейка представляла собою содержащую смешанный реагент пробирку, помещенную в полированный алюминиевый цилиндр, на дне которого находился фотоприемник – панель кремниевых лавинных фотодиодов диаметром 3 мм (твердотельный фотоэлектронный умножитель, ФЭУ). Внесение катализатора гексацианоферрата(III) калия и/или сульфата меди осуществляли с помощью разового шприца, которым прокалывали светонепроницаемую резиновую крышку фотоячейки (далее–септа)¹. При внесении катализатора наблюдали хемилюминесценцию, которую фиксировали с помощью штатного программного обеспечения хемилюминометра, обеспечивающего вывод на компьютер зависимости интенсивности света, попадающего на фотоприемник, от времени в виде графика и в виде таблицы, с разрешением 0.2 с.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены полученные нами кинетические кривые, которые представляют собой зависимость интенсивности хемилюминесценции от времени после внесения катализатора, выраженные в условных единицах. Измерив площадь под кривой, можно найти интегральную интенсивность хемилюминесценции, которая необходима далее для сравнения хемилюминесцентных кривых. Стоит уточнить понятие «катализатор» применительно к реакции люминола с пероксидом водорода. Вещества, иницирующие хемилюминесцентную реакцию в смешанном реагенте, называют катализаторами только

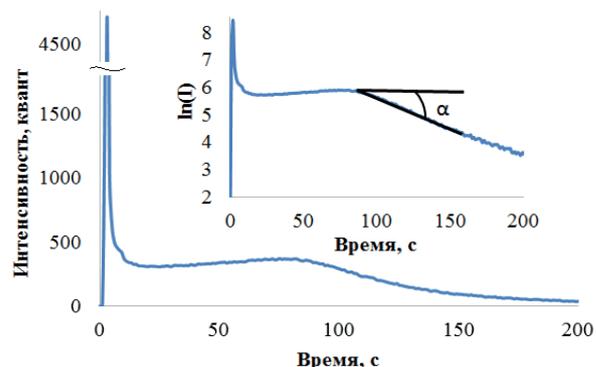


Рис. 1. Кинетическая кривая хемилюминесцентной реакции люминол–пероксид водорода–катализатор; на вставке – зависимость натурального логарифма интегральной интенсивности от времени.

¹Приготовленную реакцию систему, содержащую катализатор, можно использовать в течение 2 ч.

по традиции. В действительности они выступают в качестве реагентов и расходуются в ходе протекания реакции. Так как «катализатор» находится в недостатке, логично предположить, что реакция идет по псевдопервому порядку. Зависимость натурального логарифма интегральной интенсивности от времени

имеет линейный характер (рис. 1, вставка), что подтверждает данное предположение.

Константы скорости затухания реакции (t_{ga}) обобщены в таблице. Здесь же приведены результаты исследования влияния различных ПАВ на хемилюминесцентную систему люминол – пероксид водорода – катализатор.

Результаты исследования влияния различных ПАВ на хемилюминесцентную систему люминол – пероксид водорода – катализатор

ПАВ	Интенсивность, квант/с	Константа скорости затухания реакции, с ⁻¹
Катализатор – K ₃ [Fe(CN) ₆] (0.250 г/дм ³)		
Без ПАВ	84×10 ⁴	0.042
Катионный ПАВ (бромид цетилтриметиламмония)	13×10 ⁴	0.017
Катионный ПАВ (FT-135)	26×10 ⁴	0.019
Анионный ПАВ (додецилсульфат натрия)	109×10 ⁴	0.053
Анионный ПАВ (FT-248)	145×10 ⁴	0.056
Неионогенный ПАВ (Тритон X-100)	39×10 ⁴	0.064
Катализатор – CuSO ₄ (0.008 г/дм ³)		
Без ПАВ	13×10 ³	0.034
Катионный ПАВ (бромид цетилтриметиламмония)	9×10 ³	0.114
Анионный ПАВ (додецилсульфат натрия)	21×10 ³	0.038
Неионогенный ПАВ (Тритон X-100)	15×10 ³	0.058

Хемилюминесцентная система люминол–пероксид водорода–гексацианоферрат(III) калия. Изучение системы в присутствии катионных, анионных и неионогенных углеводородных и перфторированных поверхностно-активных веществ показало, что при добавлении к ЦТАБ наблюдается образование осадка. При этом, как видно из таблицы, происходит резкое снижение интегральной интенсивности. По-видимому, оно обусловлено образованием нерастворимой соли комплексного аниона Fe(III) с четвертичным аммониевым катионом ПАВ, и, таким образом, катализатор не участвует в хемилюминесцентной реакции (рис. 2).

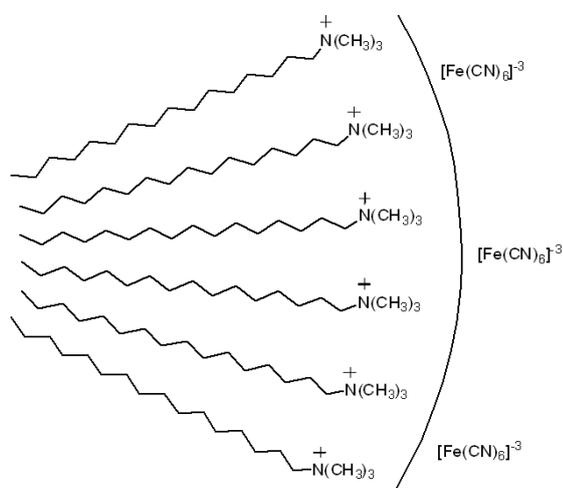


Рис. 2. Образование поверхностной соли гексацианоферрат(III)-иона с концевыми группами мицелл.

При внесении анионного углеводородного поверхностно-активного вещества додецилсульфата натрия в хемилюминесцентную систему люминол–пероксид водорода–гексацианоферрат(III) калия интегральная интенсивность возрастает (таблица). Причины такого «разгорания» пока не вполне ясны, но, возможно, присутствующие в воде микропримеси промежуточных электронно-возбужденных продуктов, которые вызывают дезактивацию, связываются додецилсульфатом.

Добавление перфторированных катионных (FT-135) и анионных (FT-248) ПАВ вызывает аналогичный эффект: катионный ПАВ уменьшает интегральную интенсивность, а анионный ПАВ – увеличивает (таблица).

Поскольку растворимость синглетного кислорода в неполярных перфторированных средах выше, чем в неполярных углеводородных, следовало ожидать значительного повышения хемилюминесцентного сигнала. Однако при переходе к растворам, содержащим мицеллы из перфторированных ПАВ, значительного увеличения интегральной интенсивности хемилюминесценции не наблюдалось. Это подтверждает общепринятое мнение, что данная реакция протекает без участия синглетного кислорода [5].

Внесение неионогенного поверхностно-активного вещества Тритон X-100 приводит к незначительному повышению интегральной интенсивности (таблица). Скорее всего, гексацианоферрат(III) не

образует поверхностную соль с мицеллами Тритона Х-100, и влияние ПАВ может быть связано с разделением реагентов.

Хемилюминесцентная система люминол–пероксид водорода–сульфат меди(II). Добавление катионного ПАВ (ЦТАБ) вызывает понижение интегральной интенсивности (таблица). Чтобы понять причину наблюдаемого эффекта, следует учесть, что в щелочной среде люминол находится в форме моноаниона, и происходит его связывание с концевыми группами положительно заряженной мицеллы ЦТАБ, а присутствие Cu(II) не оказывает влияния на хемилюминесценцию. При внесении анионного ПАВ (додецилсульфат натрия) наблюдается увеличение интегральной интенсивности (таблица). Так как поверхностная соль двухзарядного катиона меди с концевыми группами мицелл додецилсульфата растворима, то это практически не сказывается на величине хемилюминесцентного сигнала. Однако отрицательный заряд мицеллы влияет на локализованный в ней пероксид водорода, что приводит к увеличению сигнала.

При добавлении неионогенного ПАВ (Тритон Х-100) наблюдается небольшое увеличение интегральной интенсивности (таблица), что, по нашему мнению, также обусловлено разделением реагентов.

Литература / References:

1. Fletcher P., Andrew K., Calokerinos A., Forbes S., Worsfold P. Analytical applications of flow injection with chemiluminescence detection – a review // *Luminescence*. 2001. V. 16. № 16. P. 1–23.
2. Yamaguchi M., Yoshida H., Nohta H. Luminol-type chemiluminescence derivatization reagents for liquid chromatography and capillary electrophoresis // *J. Chromatography A*. 2002. V. 950. № 1. P. 1–19.
3. Meng L., Zi-Yue W., Chun-Yang Z. Recent advance in chemiluminescence assay and its biochemical applications // *Chin. J. Anal. Chem.* 2016. V. 44. № 12. P. 1934–1941.
4. Iranifam M. Revisiting flow-chemiluminescence techniques: Pharmaceutical analysis // *Luminescence*. 2013. V. 28. № 23 P. 798–820.
5. Christophe A. Marquette, Loïc J. Blum. Applications of the luminol chemiluminescent reaction in analytical chemistry // *Anal Bioanal Chem.* 2006. V. 385. P. 546–554.
6. Eun Sook Lee, Deepagan V.G., Dong Gil You, Jueun Jeon, Gi-Ra Yi, Jung Young Lee, Doo Sung Lee, Yung Doug Suh, Jae Hyung Park. Nanoparticles based on quantum dots and a luminol derivative implications for in vivo imaging of hydrogen peroxide by chemiluminescence resonance energy transfer // *Chem.*

Выводы

Измерены кинетические кривые нарастания и затухания хемилюминесценции в реакции люминол–пероксид водорода и определены константы скорости затухания хемилюминесценции в рамках кинетической модели первого порядка.

Выполнено сравнительное исследование влияния катионных, анионных и неионогенных углеводородных и перфторированных поверхностно-активных веществ на хемилюминесцентные системы люминол – пероксид водорода – гексацианоферрат(III) калия и люминол – пероксид водорода – сульфат меди(II). Установлено, что указанные системы сохраняют способность к хемилюминесценции в присутствии ПАВ. Показано, что в присутствии катионных углеводородного и перфторированного поверхностно-активных веществ интенсивность хемилюминесценции уменьшается. Добавление анионных углеводородных и перфторированных поверхностно-активных веществ к хемилюминесцентной системе люминол – пероксид водорода – катализатор вызывает увеличение интегральной интенсивности. Добавление неионогенных поверхностно-активных веществ сопровождается незначительным уменьшением интегральной интенсивности хемилюминесценции.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №16-03-00722 («Хемилюминесцентные реакции в организованных молекулярных системах»).

Comm. 2016. V. 52. № 22. P. 4132–4135.

7. Cao J., Wang H., Liu Y. Determination of l-thyroxine in pharmaceutical preparations by flow injection analysis with chemiluminescence detection based on the enhancement of the luminol–KMnO₄ reaction in a micellar medium // *Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2015. V. 140. № 140. P. 162–165.
8. Maeztu R., Tardajos G., Gonza'lez-Gaitano G. Natural cyclodextrins as efficient boosters of the chemiluminescence of luminol and isoluminol exploration of potential applications // *J. Phys. Chem. B*. 2010. V. 114. № 114 P. 2798–2806.
9. Maeztu R., Gonza'lez-Gaitano G., Tardajos G. Enhancement of the chemiluminescence of two isoluminol derivatives by nanoencapsulation with natural cyclodextrins // *J. Phys. Chem. B*. 2010. V. 114. № 32. P. 10541–10549.
10. Maeztu R., Gonza'lez-Gaitano G., Tardajos G., Stilbs P. Chemiluminescence of phthalhydrazide derivatives in organized media Interactions with surfactants and cyclodextrins // *J. Luminescence*. 2011. V. 131. № 4. P. 662–668.
11. Zhao D., Zhang G., Jiang T., Deng Z., Wu Y. Flow-injection chemiluminescence method for determination of critical micelle concentration of surfactants // *Int. J. Environm. Anal. Chem.* 2015. V. 95. № 11 P. 980–988.

12. Baxendale J.H. Pulse radiolysis study of the chemiluminescence from luminol. (5-Amino-2,3-dihydrophthalazine-1,4-dione) // *J. Chem. Soc. Faraday Trans. 1*. 1973. V. 69. P. 1665–1667.

13. Lind J., Merenyi G., Eriksen T.E. Chemiluminescence mechanism of cyclic hydrazides such as luminol in aqueous solutions // *J. Amer. Chem. Soc.* 1983. V. 105. P. 7655–7661.

14. Merenyi G., Lind J., Eriksen T.E. The reactivity of superoxide (O₂⁻) and its ability to induce chemiluminescence with luminol // *Photochem. Photobiol.* 1985. Vol. 41. P. 203–208.

15. Merenyi G., Lind J., Eriksen T.E. Nucleophilic addition to diazaquinones. Formation and breakdown of tetrahedral intermediates in relation to luminol chemiluminescence // *J. Amer. Chem. Soc.* 1986. V. 108. P. 7716–7726.

16. Merenyi G., Lind J., Shen X., Eriksen T.E. Oxidation potential of luminol is the autooxidation of singlet organic molecules an outer-sphere electron transfer // *J. Phys. Chem. B*. 1990. V. 94. № 2. P. 748–752.

17. Михеева И.В., Трофимов С.И., Харитонов Ю.С. Микробиологическое исследование хемилюминесцентным экспресс-методом антропогенного загрязнения реки Сходня // Научные и образовательные

проблемы гражданской защиты. 2011. №1. С. 31–36.

Mikheeva I.V., Trofimov S.I., Kharitonova Y.S. Microbiological investigation by chemiluminescent express method of anthropogenic pollution of the Shodnya river // *Nauchnie i obrazovatelnie problem gragdanskoj zaschiti* (Scientific and Educational Problems of Civil Protection). 2011. № 1. P. 31–36. (in Russ.)

18. ГОСТ Р 54354-2011. Мясо и мясные продукты. Общие требования и методы микробиологического анализа. Введ. 12.07.2011. М.: Стандартинформ, 2013. С. 42.

GOST R 54354-2011. Meat and meat products. General requirements and methods of microbiological analysis. Moscow: Standartinform, 2013. P. 42. (in Russ.).

19. Трофимов С.И. Экспрессный способ определения микробного загрязнения сыпучих и волокнистых органических продуктов и сыпучих минеральных материалов: пат. 2467313 Рос. Федерация. № 2011135862/15; заявл. 29.08.2011; опубл. 20.11.2012, Бюл. № 32. С. 5.

Trofimov S.I. Express method for the detection of microbial contamination of bulk and fibrous organic products and bulk mineral materials: Pat. 2467313 Ros. Federation. № 2011135862/15; appl. 29/08/2011; publ. 20.11.2012. (in Russ.).

Об авторах:

Ибрагимова Диана Ахмедовна, студентка кафедры аналитической химии имени И.П. Алимарина Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

Камиль Осамх Мохаммед, студент кафедры аналитической химии имени И.П. Алимарина Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

Янькова Татьяна Вячеславовна, аспирантка кафедры химической кинетики Химического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1).

Яштулов Николай Андреевич, доктор химических наук, профессор кафедры энергетических технологий, систем и установок Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

Зайцев Николай Конкордиевич, доктор химических наук, доцент, заведующий кафедрой энергетических технологий, систем и установок Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

About authors:

Diana A. Ibragimova, Student, I.P. Alimarin Chair of Analytical Chemistry, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia).

Osamah M. Kamil, Student, I.P. Alimarin Chair of Analytical Chemistry, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia).

Tatyana V. Yankova, Postgraduate Student, Chair of Chemical Kinetics, Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia).

Nikolai A. Yashtulov, Dr.Sc. (Chemistry), Professor, Chair of Energy Technologies, Systems and Installations, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia).

Nikolay K. Zaitsev, Dr.Sc. (Chemistry), Docent, Head of the Chair of Energy Technologies, Systems and Installations, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia).