

ISSN 1561-8331 (Print)

ISSN 2524-2342 (Online)

УДК 54.062 + 543.544 (33+7.087.9) + 543.613.3

<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-4-340-346>

Поступила в редакцию 19.09.2023

Received 19.09.2023

С. В. Черепица², С. Н. Сытова², Л. Н. Соболенко¹, А. Н. Коваленко²,
Д. В. Юшкевич^{1,2}, М. Ф. Заяц¹, В. В. Егоров¹, С. М. Лещёв¹

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

²Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННОГО СОДЕРЖАНИЯ ЛЕТУЧИХ КОМПОНЕНТОВ В ЭТАНОЛСОДЕРЖАЩЕЙ ПРОДУКЦИИ

Аннотация. Предложен метод корректного определения количественного содержания летучих компонентов, включая этиловый спирт, в спиртосодержащей продукции. Метод основан на использовании данных измерения плотности образца и хроматографических данных определения количественного содержания летучих компонентов. Показано, что в ряде случаев различие между величинами объемного содержания этилового спирта в алкогольной продукции, рассчитанными по межгосударственному стандарту ГОСТ 3639 и по предложенному методу, превышает более чем в 7 раз заявленный предел погрешности измерения в 0,1 % объемных. Полученные результаты могут быть использованы при актуализации государственных, межгосударственных и международных стандартов по контролю качества и безопасности алкогольной и спиртосодержащей продукции.

Ключевые слова: этанолсодержащая продукция, алкогольная и спиртосодержащая продукция, летучие компоненты, содержание этанола

Для цитирования. Определение количественного содержания летучих компонентов в этанолсодержащей продукции / С. В. Черепица [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 2024. – Т. 60, № 4. – С. 340–346. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-4-340-346>

S. V. Charapitsa², S. N. Sytova², L. N. Sabalenka¹, A. N. Kavalenka², D. V. Yushkevitch^{1,2},
M. F. Zayats¹, V. V. Egorov¹, S. M. Leschev¹

¹Belarusian State University, Minsk, Belarus

²Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus

DETERMINATION OF THE QUANTITATIVE CONTENT OF VOLATILE COMPONENTS IN ETHANOL-CONTAINING PRODUCTS

Abstract. A method is proposed for correctly determining the quantitative content of volatile components, including ethyl alcohol, in alcohol-containing products. The method is based on the use of sample density measurement data and chromatographic data for determining the quantitative content of volatile compounds. It is shown that in a number of cases the difference between the values of the volumetric content of ethyl alcohol in alcoholic products, calculated according to the interstate standard GOST 3639 and according to the proposed method, exceeds by several times the declared measurement error limit of 0.1 % by volume. The results obtained can be used to update state, interstate and international standards for quality control and safety of alcoholic and alcohol-containing products.

Keywords: alcoholic and alcohol-containing products, ethanol content, gas chromatography

For citation. Charapitsa S. V., Sytova S. N., Sabalenka L. N., Kavalenka A. N., Yushkevitch D. V., Zayats M. F., Egorov V. V., Leschev S. M. Determination of the quantitative content of volatile components in ethanol-containing products. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Science of Belarus. Chemical series*, 2024, vol. 60, no. 4, pp. 340–346 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-4-340-346>

Введение. Определение объемной доли этилового спирта в алкогольной продукции (крепости) в настоящее время выполняется посредством измерения плотности анализируемого образца и последующим расчетом искомой концентрации этанола по алколетметрическим таблицам [1–4]. Табулированные значения концентрации этанола в зависимости от измеренной плотности испытываемого образца представлены только для водно-этанольных смесей. На практике во многих видах испытываемой алкогольной продукции наряду с этиловым спиртом присутствует заметная доля других летучих компонентов, таких как ацетальдегид, этилацетат, метиловый спирт, изопропанол, пропанол, изобутанол, бутанол и изоамилол [1–11]. Величина плотности исследуемого образца алкогольной продукции обусловлена как величинами концентраций этилового спирта и воды, так и всеми величинами концентраций присутствующих в образце летучих компонентов.

Важно обратить внимание, что все физические методы определения плотности алкогольной продукции [1–4] не различают источники формирования плотности образца.

Учет концентраций летучих компонентов в спиртосодержащей продукции в ряде случаев приводит к заметному долевному вкладу этих компонентов в величину плотности образца. Как следствие, расчет объемного содержания этилового спирта по водно-спиртовым таблицам на основе только измеренной плотности образца для таких спиртосодержащих продуктов дает величину крепости, которая может значительно отличаться от истинной крепости. Использование некорректно рассчитанного объемного содержания этилового спирта приводит к неверным результатам определения величин концентраций летучих компонентов в спиртосодержащей продукции, выраженных в миллиграммах на литр безводного спирта.

Учет измеренной величины плотности исследуемого образца совместно с определенными величинами количественного содержания летучих компонентов в безводной части образца позволяет корректно определить объемное содержание этанола в спиртосодержащем продукте.

Математическая модель этанолсодержащего раствора. Для описания расчетов концентрационного состава исследуемого спиртосодержащего образца будем полагать, что он приготовлен путем смешения двух отдельных растворов. Первый исходный раствор представляет собой чистую воду, второй – безводную часть исследуемого образца, состоящую из летучих компонентов, включая этиловый спирт.

Плотность раствора после смешения воды с безводной частью образца может быть представлена следующим выражением:

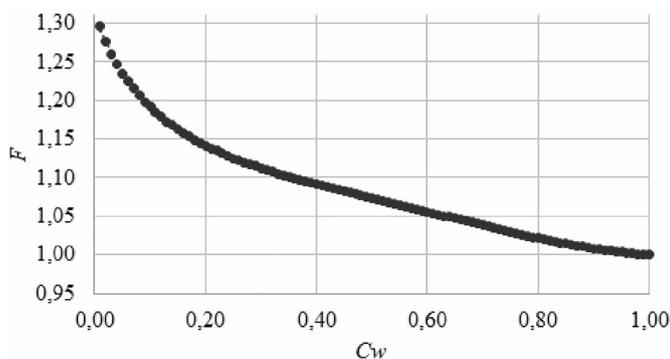
$$\rho_S = C_W \cdot \rho_W^{eff} + (1 - C_W) \cdot \sum_{(i)} \rho_i \cdot C_i^*, \quad (1)$$

где ρ_S – плотность раствора, мг/л; $\rho_W^{eff} = \rho_W F(C_w)$ – эффективная плотность воды в смеси, мг/л; ρ_W – плотность чистой воды при 20 °C, $\rho_W = 998\,230$ мг/л; $F(C_w)$ – фактор, учитывающий эффект увеличения эффективной плотности воды при смешивании ее с этанолом; ρ_i – плотность i -го летучего компонента, мг/л; C_i^* – объемная доля i -го летучего компонента, в том числе этилового спирта, в безводной части образца, мл/мл; C_W – объемная доля воды в образце, мл/мл.

Зависимость фактора F от объемной доли воды в образце является монотонной функцией без экстремумов. Аналитическая зависимость величины F в диапазоне значений объемной доли воды в испытуемом образце C_W от 0,03 до 1,00 может быть представлена в виде эмпирической формулы:

$$F(C_W) = aC_W^6 + bC_W^5 + cC_W^4 + dC_W^3 + eC_W^2 + fC_W + g, \quad (2)$$

где численные значения коэффициентов a, b, c, d, e, f и g вычисляются при аппроксимации функции F по водно-спиртовым таблицам [3, 4]. Графический вид функции F представлен на рисунке.



Аналитическая функция зависимости фактора F от объемной доли воды в испытуемом образце C_W
 Analytical function of the dependence of the factor F on the volume fraction of water in the test sample C_W

Объемные доли i -х летучих компонентов, в том числе этанола, в безводной части образца C_i^* могут быть представлены следующим уравнением:

$$C_i^* = \left(\frac{\tilde{C}_i}{\rho_i} \right) / \left(\sum_{(i)} \frac{\tilde{C}_i}{\rho_i} \right), \quad (3)$$

где \tilde{C}_i – массовая концентрация i -го летучего компонента в безводной части образца, в том числе этанола, мг/л безводного спирта (АА), определяется из хроматографических данных методом прямого определения концентраций летучих компонентов с использованием этанола в качестве внутреннего стандарта [12–14].

Массовые концентрации \tilde{C}_i дополнительно определяются по следующим формулам:

$$\tilde{C}_i = RRF_i \frac{A_i}{A_{Eth}} \rho_{Eth}, \quad (4)$$

$$RRF_i = \left(\frac{\tilde{C}_i^{st}}{A_i^{st}} / \frac{\rho_{Eth}}{A_{Eth}^{st}} \right), \quad (5)$$

где A_i , A_{Eth} – площади хроматографических пиков i -го летучего компонента и этанола в исследуемом образце, произвольные единицы (пр. ед.); ρ_{Eth} – плотность безводного этанола при 20 °С, $\rho_{Eth} = 789,270$ мг/л; RRF_i – относительные отклики детектора для i -го летучего компонента относительно этанола; A_i^{st} , A_{Eth}^{st} – площади хроматографических пиков i -го летучего компонента и этанола при измерении стандартной смеси для градуировки хроматографа, произвольные единицы (пр. ед.); \tilde{C}_i^{st} – концентрация i -го летучего компонента в стандартной смеси для градуировки хроматографа, мг/л безводного спирта.

После подстановки (3) в (1) получается выражение для определения объемной доли воды в образце:

$$C_W = \frac{\rho_S \sum_{(i)} \frac{\tilde{C}_i}{\rho_i} - \sum_{(i)} \tilde{C}_i}{\rho_W F(C_W) \sum_{(i)} \frac{\tilde{C}_i}{\rho_i} - \sum_{(i)} \tilde{C}_i}. \quad (6)$$

Объемная доля i -го летучего компонента, в том числе этанола, в образце C_i может быть представлена следующим уравнением:

$$C_i = (1 - C_W) C_i^*. \quad (7)$$

Функция $F(C_W)$ является медленноменяющейся, гладкой, и систему уравнений (1)–(6) можно решать методом последовательных приближений. В нулевом приближении величина $F^{(0)}(C_W) = 1$.

Тогда выражения (6) и (7) будут представлены в следующем виде:

$$C_W^{(0)} = \frac{\rho_S \sum_{(i)} \frac{\tilde{C}_i}{\rho_i} - \sum_{(i)} \tilde{C}_i}{\rho_W \sum_{(i)} \frac{\tilde{C}_i}{\rho_i} - \sum_{(i)} \tilde{C}_i}, \quad (8)$$

$$C_i^{(0)} = (1 - C_W^{(0)}) C_i^*. \quad (9)$$

В j -ом приближении величина функции $F(C_W)$ вычисляется по формуле (2) при значении аргумента $C_W^{(j-1)}$. Соответствующие выражения для величин концентрации воды и летучих компонентов (6) и (7) будут представлены в следующем виде:

$$C_W^{(j)} = \frac{\rho_S \sum_{(i)} \tilde{C}_i - \sum_{(i)} \tilde{C}_i}{\rho_W F \left(C_W^{(j-1)} \right) \sum_{(i)} \tilde{C}_i - \sum_{(i)} \tilde{C}_i}, \quad (10)$$

$$C_i^{(j)} = \left(1 - C_W^{(j)} \right) C_i^*. \quad (11)$$

Решения системы линейных алгебраических уравнений (2), (10), (11) можно найти численно, запрограммировав алгоритм последовательных итераций, например, в вычисляемых электронных таблицах MS Excel. Число итераций было выбрано равным 16.

Таким образом, на основании данных измерений плотности по ГОСТ 3639 [2] и хроматографических данных компонентного состава по формуле (9) определяется величина объемной концентрации воды в образце, мл/мл, и по формуле (10) определяются величины объемных концентраций *i*-х летучих компонентов, в том числе этанола, в образце, мл/мл.

Важно обратить внимание, что никаких дополнительных, относительно регламентных измерений не требуется. Концентрации этанола, воды и всех летучих компонентов исследуемого спиртосодержащего образца можно рассчитать по формулам (9) и (10) на основе полученных исходных данных хроматографического анализа и измерения плотности образца.

Экспериментальные исследования. Для оценки эффективности предложенной модели расчета объемного содержания этилового спирта в алкогольной продукции на основе экспериментальных данных хроматографического анализа и измерения плотности образца была разработана компьютерная программа DVCAP (Determination of Volatile Compounds in Alcohol Products) [16].

Корректность работы программы была исследована на примере анализа значений объемного содержания этилового спирта, полученных по водно-спиртовым растворам в соответствии с ГОСТ 3639 [2] на основе данных измеренной плотности исследуемого водно-этанольного раствора и рассчитанных программой.

Во всем диапазоне величин плотности испытуемых водно-этанольных растворов от 794 310 до 996 750 мг/л, что соответствует диапазону величин объемного содержания этанола от 1 до 100 %, различие между величинами крепости, рассчитанных по двум методам не превысило 0,046 %.

Результаты экспериментальных исследований по определению количественного содержания летучих компонентов, включая этанол, в образцах алкогольных напитков ракия, сливовица и в концентрате головных и промежуточных продуктов (КГиПП) представлены в табл. 1 и 2. Измерение плотности исследуемых спиртосодержащих образцов выполнялось пикнометрическим методом в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 3639 [2] в дистилляте при 20 °С после предварительной перегонки в соответствии с государственным стандартом Республики Беларусь СТБ 1929 (ГОСТ Р 51653) [15].

Таблица 1. Результаты измерений образцов спиртосодержащих продуктов

Table 1. Results of measurements of alcohol-containing product samples

Компонент	Массовая концентрация в образце, мг/л безводного спирта		
	Ракия	КГиПП	Сливовица
Ацетальдегид	111	2 098	114
Метилацетат	46,3	–	912
Этилацетат	1 167	7 786	97,1
Метанол	12 252	2 479	10 603
Пропан-2-ол	11,2	–	–
Бутан-2-ол	–	78,3	166
Пропан-1-ол	4 216	2 736	4 029
2-метилпропан-1-ол	454	17 829	443
Бутан-1-ол	42	23,0	39,7
2-метилбутан-1-ол			365
3-метилбутан-1-ол	1 309	14 400	1 245

Максимальная величина расширенной относительной неопределенности массовой концентрации исследуемых летучих компонентов не превосходит 11 % ($P = 0,95, k = 2$) [14].

Таблица 2. Результаты определения характеристик образцов спиртосодержащих продуктов

Table 2. Results of determining the characteristics of samples of alcohol-containing products

Характеристика	Образец		
	Ракия	КГиПП	Сливовица
Плотность образца, мг/л	948 060	838 550	939 560
Объемное содержание этанола по ГОСТ 3639 [2], %	40,0 ± 0,1	87,0 ± 0,1	45,0 ± 0,1
Объемное содержание этанола, рассчитанное по предложенному методу, %	39,17 ± 0,2	83,85 ± 0,2	44,15 ± 0,2
Абсолютная разность, %	0,83	3,15	0,85

Анализ полученных результатов экспериментальных исследований показывает, что учет концентраций летучих компонентов в ряде алкогольной и спиртосодержащей продукции приводит к значимым смещениям установленных величин объемного содержания этилового спирта по сравнению с величинами, рассчитанными непосредственно по водно-спиртовым таблицам. Как следствие, для определения объемного содержания этилового спирта в алкогольной и спиртосодержащей продукции с заявленным в ГОСТ 3639 [2] пределом погрешности измерения в 0,1 % объемных необходимо учитывать концентрации летучих компонентов испытываемого образца.

Заключение. Предложенный метод определения объемного содержания этилового спирта в алкогольной и спиртосодержащей продукции на основе измеренной величины плотности испытываемого образца и хроматографических данных количественного содержания летучих компонентов позволяет обеспечить достоверное определение объемного содержания этилового спирта [16]. Результаты выполненных исследований могут быть использованы при актуализации государственных, межгосударственных и международных стандартов по контролю качества и безопасности алкогольной и спиртосодержащей продукции.

Список использованных источников

1. Commission Regulation (EC) № 2870/2000 laying down Community reference methods for the analysis of spirits drinks [Electronic resource] // Official Journal. – 2000. – L 333. – Mode of access: <http://data.europa.eu/eli/reg/2000/2870/oj>. – Date of access: 01.02.2023.
2. Растворы водно-спиртовые. Методы определения концентрации этилового спирта: ГОСТ 3639-79. – Введ. 01.01.1982. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 12 с.
3. Максимова, М. И. Таблицы для определения объема и содержания этилового спирта в водно-спиртовых растворах / М. И. Максимова. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. – 144 с.
4. International alcoholometric tables [Electronic resource]. – Mode of access: https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r022-e75.pdf. – Date of access: 01.02.2023.
5. Бренди фруктовые. Общие технические условия: СТБ 2368-2014. – Введ. 01.01.2015. – Минск: Госстандарт: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2014. – 12 с.
6. Спирт-сырец этиловый из пищевого сырья. Технические условия: СТБ 1952-2009. – Введ. 01.09.2009. – Минск: Госстандарт: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2009. – 12 с.
7. Водки фруктовые. Общие технические условия: СТБ 2369-2014. – Введ. 01.01.2015. – Минск: Госстандарт: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2014. – 16 с.
8. Коньяки. Общие технические условия: СТБ 1386-2013. – Введ. 01.04.2014. – Минск: Госстандарт: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2013. – 16 с.
9. Кальвадос белорусский. Общие технические условия: СТБ 2138-2011. – Введ. 01.05.2016. – Минск: Госстандарт: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2011. – 16 с.
10. Дистиллят винный. Технические условия: ГОСТ 31493-2012. – Введ. 01.01.2015. – М.: Стандартинформ, 2013. – 12 с.
11. Regulation (EC) No 110/2008 of the European Parliament and of the Council of 15 January 2008 on the Definition, Description, Presentation, Labelling and the Protection of Geographical Indications of Spirit Drinks and Repealing Council Regulation (EEC) No 1576/89 [Electronic resource] // Official Journal of the European Union. – 2008. – L 39/16. – Mode of access: [http://data.europa.eu/eli/reg/2008/110\(1\)/oj](http://data.europa.eu/eli/reg/2008/110(1)/oj). – Date of access: 01.02.2023.
12. Метод определения содержания летучих компонентов в алкогольной продукции с использованием этанола в качестве внутреннего стандарта: результаты межлабораторных испытаний / С. В. Черепица [и др.] // Журн. Белорус. гос. ун-та. Химия. – 2020. – № 1. – С. 74–87. <https://doi.org/10.33581/2520-257X-2020-1-74-87>

13. Совершенствование контроля качества и безопасности алкогольной и спиртосодержащей продукции / С. В. Черепица [и др.] // Контроль качества продукции. – 2021. – № 11. – С. 41–46.
14. Инновационный метод определения количественного содержания летучих компонентов в алкогольной продукции / Л. Н. Соболенко [и др.] // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2022. – Т. 15, № 4. – С. 88–99. [https://doi.org/10.47612/2073-4794-2022-15-4\(58\)-88-99](https://doi.org/10.47612/2073-4794-2022-15-4(58)-88-99)
15. Винодельческая продукция и винодельческое сырье. Метод определения объемной доли этилового спирта: СТБ 1929-2009 (ГОСТ Р 51653-2000). – Введ. 01.07.2009. – Минск: Госстандарт: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2009. – 14 с.
16. Корректное определение объемного содержания этилового спирта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elab.bsu.by/article/747>. – Дата доступа: 01.02.2023.

References

1. Commission Regulation (EC) № 2870/2000 laying down Community reference methods for the analysis of spirits drinks. *Official Journal*, 2000, L 333. Available at: <http://data.europa.eu/eli/reg/2000/2870/oj> (accessed 1 February 2023).
2. State Standard 3639-79. *Water-alcohol solutions. Methods for determining the concentration of ethyl alcohol*. Moscow, ИПК Standards Publishing House, 2004. 12 p. (in Russian).
3. Maksimova M. I. *Tables for determining the volume and content of ethyl alcohol in water-alcohol solutions*. Moscow, ИПК Standards Publishing House, 1999. 144 p. (in Russian).
4. *International alcoholometric tables*. Available at: https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r022-e75.pdf (accessed 1 February 2023).
5. STB 2368-2014. *Fruit brandy. General technical conditions*. Minsk, Gosstandart, Belarusian State Institute of Standardization and Certification, 2014. 12 p. (in Russian).
6. STB 1952-2009. *Raw ethyl alcohol from food raw materials. Technical specifications*. Minsk, Gosstandart, Belarusian State Institute of Standardization and Certification, 2009. 12 p. (in Russian).
7. STB 2369-2014. *Fruit vodkas. General technical conditions*. Minsk, Gosstandart, Belarusian State Institute of Standardization and Certification, 2014. 16 p. (in Russian).
8. STB 1386-2013. *Cognacs. General technical conditions*. Minsk, Gosstandart, Belarusian State Institute of Standardization and Certification, 2013. 16 p. (in Russian).
9. STB 2138-2011. *Belarusian Calvados. General technical conditions*. Minsk, Gosstandart, Belarusian State Institute of Standardization and Certification, 2011. 16 p. (in Russian).
10. State Standard 31493-2012. *Wine distillate. Technical specifications*. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 12 p. (in Russian).
11. Regulation (EC) No 110/2008 of the European Parliament and of the Council of 15 January 2008 on the Definition, Description, Presentation, Labelling and the Protection of Geographical Indications of Spirit Drinks and Repealing Council Regulation (EEC) No 1576/89. *Official Journal of the European Union*, 2008, L 39/16. Available at: [http://data.europa.eu/eli/reg/2008/110\(1\)/oj](http://data.europa.eu/eli/reg/2008/110(1)/oj) (accessed 1 February 2023) (in Russian).
12. Charapitsa S. V., Sytova S. N., Korban A. L., Sobolenko L. N., Egorov V. V., Leschev S. M., Cabala R., Yilmaztekin M., Cabaroglu T. Interlaboratory Study of the method for direct determination of volatile compounds in alcoholic products using ethanol as Internal Standard *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Himiya = Journal of the Belarusian State University. Chemistry*, 2020, vol. 1, pp. 74–87 (in Russian). <https://doi.org/10.33581/2520-257X-2020-1-74-87>
13. Charapitsa S. V., Sytova S. N., Sobolenko L. N., Kolesnov A. Y., Tsimbalaev S. R. Improving quality and safety control of alcoholic and alcohol-containing products. *Kontrol' kachestva produkcii = Production Quality Control*, 2021, № 11, pp. 41–46 (in Russian).
14. Sabalenka L. N., Charapitsa S. V., Sytova S. N., Kavalenka A. N., Zayats M. F., Egorov V. V., Leschev S. M., Melsitava I. V. Innovative method for determining the quantitative content of volatile compounds in alcohol products. *Pishhevaya promyshlennost': nauka i tehnologii = Food industry: science and technology*, 2022, vol. 15, no. 4, pp. 88–99 (in Russian). [https://doi.org/10.47612/2073-4794-2022-15-4\(58\)-88-99](https://doi.org/10.47612/2073-4794-2022-15-4(58)-88-99)
15. STB 1929-2009 (State Standard P 51653-2000). *Wine products and wine raw materials. Method for determining the volume fraction of ethyl alcohol*. Minsk: Gosstandart: Belarusian state Institute of Standardization and Certification, 2009. 14 p. (in Russian).
16. *Correct determination of the volumetric content of ethyl alcohol*. Available at: <https://elab.bsu.by/article/747> (accessed 2 January 2023) (in Russian).

Информация об авторах

Черепица Сергей Вячеславович – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник. Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета (ул. Бобруйская, 11, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: siarhei.charapitsa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9657-1948>.

Information about the authors

Charapitsa Siarhei V. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor. Leading Researcher. Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University (11, Babruiskaya Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: siarhei.charapitsa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9657-1948>.

Сытова Светлана Николаевна – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета (ул. Бобруйская, 11, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: s_sytova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2476-9979>

Соболенко Лидия Николаевна – аспирант. Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 14, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lidia.sobolenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5066-7194>

Коваленко Антон Николаевич – старший научный сотрудник. Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета (ул. Бобруйская, 11, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: anton@inp.bs.u.by, <https://orcid.org/0000-0002-0320-2092>

Юшкевич Даниил Владимирович – студент 5-го курса. Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 14, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: yushkevitchdv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3237-6179>

Заяц Михаил Федорович – доктор химических наук, заведующий кафедрой. Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 14, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mikhail_zayats@tut.by, <https://orcid.org/0000-0002-8400-6359>

Егоров Владимир Владимирович – доктор химических наук, профессор. Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 14, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: egorvv@bsu.by, <https://orcid.org/0000-0001-9414-0423>

Лещёв Сергей Михайлович – доктор химических наук, профессор. Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 14, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: leschev.sergey54@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5378-1718>

Sytova Svetlana N. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor. Head of the Laboratory. Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University (11, Babruiskaya Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: s_sytova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2476-9979>

Sobalenka Lidziya N. – Postgraduate Student. Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lidia.sobolenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5066-7194>

Kavalenka Anton N. – Senior Researcher. Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University (11, Babruiskaya Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: anton@inp.bs.u.by, <https://orcid.org/0000-0002-0320-2092>

Yushkevitch Daniil V. – 5th year Student. Belarusian State University, (14, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yushkevitchdv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3237-6179>

Zayats Mikhail F. – D. Sc. (Chemistry), Head of the Department. Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mikhail_zayats@tut.by, <https://orcid.org/0000-0002-8400-6359>

Egorov Vladimir V. – D. Sc. (Chemistry), Professor. Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: egorvv@bsu.by, <https://orcid.org/0000-0001-9414-0423>

Leschev Sergey M. – D. Sc. (Chemistry), Professor. Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: leschev.sergey54@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5378-1718>