
**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ
МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ**

**INSTRUMENTS AND METHODS FOR MONITORING AND DIAGNOSING
MATERIALS, PRODUCTS, SUBSTANCES AND THE NATURAL ENVIRONMENT**

УДК 681.785.2
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-7-594-601

**РЕФРАКТОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ
ЭТАНОЛА, ПРОПАНОЛА И ИХ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ**

А. В. АРЕФЬЕВ¹, О. В. АФАНАСЬЕВА², А. В. ДАГАЕВ³, В. В. КУРЛОВ¹,
Е. Е. МАЙОРОВ^{1*}, И. С. ТАЮРСКАЯ⁴

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия
*majorov_ee@mail.ru

² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

³ Ивановгородский гуманитарно-технический институт (филиал)
Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия

⁴ Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследования этанола, пропанола и их водных растворов методом полного внутреннего отражения, который характеризуется высокой точностью и обеспечивает достоверность измерений. Приведены оптическая схема и технические характеристики рефрактометра AP-4, предназначенного для измерения оптических параметров исследуемых веществ. Получены зависимости показателя преломления от концентрации и температуры растворов при концентрации $k = 0 \dots 100$ % и температуре $t = 10 \dots 40$ °C на длине волны $\lambda = 589$ нм; приведены результаты кубической интерполяции зависимости показателя преломления от концентрации и температуры растворов.

Ключевые слова: рефрактометр, этанол, пропанол, показатель преломления, температура, концентрация, призма, раствор

Ссылка для цитирования: Арефьев А. В., Афанасьева О. В., Дагаев А. В., Курлов В. В., Майоров Е. Е., Таюрская И. С. Рефрактометрические методы и средства контроля этанола, пропанола и их водных растворов // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 7. С. 594—601. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-7-594-601.

**REFRACTOMETRIC METHODS AND MEANS OF CONTROL
OF ETHANOL, PROPANOL, AND THEIR AQUEOUS SOLUTIONS**

A. V. Arefiev¹, O. V. Afanaseva², A. V. Dagaev³, V. V. Kurlov¹,
E. E. Maiorov^{1*}, I. S. Tayurskaya⁴

¹ St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russia
*majorov_ee@mail.ru

² St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

³ Ivangorod Humanitarian and Technical Institute,
Branch of St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

⁴ St. Petersburg University of Management Technologies and Economics, St. Petersburg, Russia

© Арефьев А. В., Афанасьева О. В., Дагаев А. В., Курлов В. В., Майоров Е. Е., Таюрская И. С., 2023

Abstract. Results of research into ethanol, propanol and their aqueous solutions by the total internal reflection method, which is characterized by high accuracy and provides reliable measurements, are presented. Optical scheme and technical characteristics of the AR-4 refractometer designed to measure the optical parameters of the studied substances are given. The dependences of the refractive index on the concentration and temperature of solutions were obtained at concentrations $k = 0...100\%$ and temperatures $t = 10...40\text{ }^\circ\text{C}$ at a wavelength $\lambda = 589\text{ nm}$; cubic interpolations of the refractive index dependences of the concentration and temperature of the solutions are demonstrated.

Keywords: refractometer, ethanol, propanol, refractive index, temperature, concentration, prism, solution

For citation: Arefiev A. V., Afanaseva O. V., Dagaev A. V., Kurlov V. V., Maiorov E. E., Tayurskaya I. S. Refractometric methods and means of control of ethanol, propanol, and their aqueous solutions. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 7. P. 594—601 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-7-594-601.

Введение. Этанол ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) и пропанол ($\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$) широко применяются в химической и пищевой промышленности, косметологической и фармацевтической индустриях, а также в медицине [1, 2]. В исследовании $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ и их водных растворов особое значение имеют рефрактометрические методы и средства, основанные на анализе отраженного светового излучения от изучаемой жидкофазной среды [3]. Применяемые для контроля $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ и их водных растворов рефрактометрические приборы находятся в специализированных лабораториях, где определяется состав вещества [4, 5].

Для получения высокоточных, информативных и достоверных данных об исследуемой пробе необходимо иметь количественные данные по оптическим параметрам чистых $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ и их водных растворов [6, 7]. Важно знать показатель преломления этих веществ в зависимости от концентрации и температуры раствора. Анализ научной литературы показал, что такие данные приведены на качественном уровне и представляют интерес оценочного характера [8—14].

Для измерения оптических параметров чистых $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ и их водных растворов в работе выбор был сделан в пользу рефрактометра AR-4 [15]. Этот прибор пригоден для анализа представленных жидкостей и имеет низкотемпературный и высокотемпературный режимы измерений [17]. Прибор оснащен функцией „автоматическая температурная компенсация“, что позволяет проводить измерения независимо от температуры окружающей среды для жидкостей с разной температурой ($t = 40...120\text{ }^\circ\text{C}$).

Цель настоящей статьи — измерение оптических параметров чистых $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ и их водных растворов на рефрактометре AR-4 в лабораторных условиях.

Постановка задачи — получение и анализ зависимости показателя преломления веществ от концентрации растворов $k = 0...100\%$ и температуры $t = 10...40\text{ }^\circ\text{C}$ на длине волны $\lambda = 589\text{ nm}$.

Метод и объект исследования. Для исследования оптических параметров веществ были приготовлены пробы, где чистые $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ и $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ смешивались с дистиллированной водой. Концентрация растворов составляла $0...100\%$. Взвешивание проб проводилось на высокоточных и надежных аналитических весах Shinko Vibra HT-224 CE на базе акустического датчика с пределами взвешивания $0,01—220\text{ г}$ и погрешностью измерений $0,0001\text{ г}$. Весы имеют ветрозащитный экран, жидкокристаллический дисплей с яркой подсветкой, гистогramму нагрузки и совместимый интерфейс для передачи данных на принтер или персональный компьютер (ISO/GLP/GMP). Температура проб $t = 10...40\text{ }^\circ\text{C}$.

Для измерений зависимостей показателя преломления от концентрации и температуры растворов применялся рефрактометр AR-4, внешний вид которого представлен на рис. 1.



Рис. 1

Рефрактометр AR-4 предназначен для измерения показателя преломления неагрессивных жидкостей, твердых, порошкообразных и пастообразных образцов, а также для измерения массовой доли растворимых сухих веществ (сахарозы) в водных растворах по Международной сахарной шкале Brix (% Брикс). AR-4 является прибором визуального контроля: результат измерения считывается через окуляр по шкале в смотровом поле. Корпус рефрактометра изготовлен из листового алюминия и опломбирован от несанкционированного проникновения. В качестве внешнего источника света используется светодиод с максимумом интенсивности излучения на длине волны 589 нм (соответствует линии D в спектре излучения натрия).

Технические характеристики рефрактометра AR-4:

- диапазон измерений — 1,3000...1,7000 nD, 0...95 % Брикс;
- погрешность измерений — $\pm 0,0002$ nD, $\pm 0,1$ % Брикс;
- разрешение — 0,0005 nD, 0,25 % Брикс;
- питание — 220 В;
- размеры и вес — 10×27×19 см, 2,5 кг;
- термометр — цифровой термометр $-40...+120$ °С;
- подсветка — подсветка шкалы, светодиодная подсветка призмы (590 нм).

Оптическая схема прибора представлена на рис. 2, где 1 — источник света, 2 — конденсор, 3 — осветительная призма, 4 — призма, 5 — призма прямого зрения, 6 — объектив зрительной трубы, 7 — сетка с перекрестием, 8 — шкала, 9 — окуляр зрительной трубы, 10 — поле зрения окуляра.

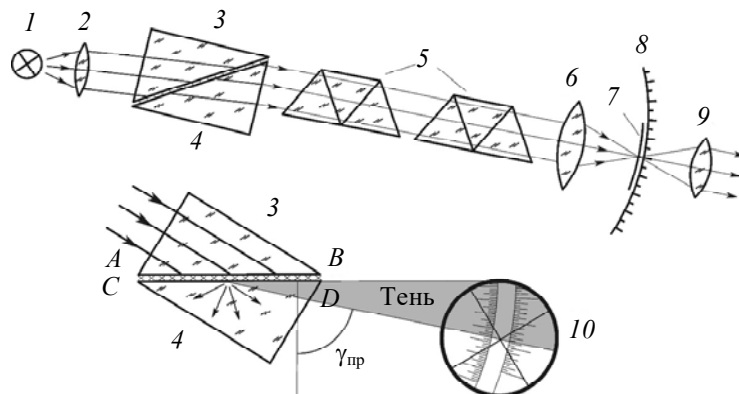


Рис. 2

Исследуемый раствор помещают между плоскостями двух призм — осветительной 3 и измерительной 4, изготовленных из стекла с большим показателем преломления (n). Шкала прибора проградуирована до значения $n = 1,7$. От источника 1 пучок света направляется конденсором 2 на входную грань осветительной призмы. Пройдя осветительную призму 3, свет падает на ее матовую гипотенузную грань AB , граничащую с тонким слоем исследуемой

жидкости. Матовая поверхность имеет неровности, размеры которых — несколько длин волн. Свет рассеивается на этих неровностях по всей поверхности и, пройдя через тонкий слой раствора, падает на границу раздела „раствор—стекло“ под различными углами, т.е. угол падения изменяется в пределах от 0 до 90°.

На зеркальной гипотенузной грани *CD* измерительной призмы 4 свет преломляется, угол преломления изменяется в пределах от нуля до $\gamma_{пр}$. Таким образом, при угле преломления, равном $\gamma_{пр}$, возникает граница свет — тень.

Экспериментальные результаты. Экспериментальные результаты измерения зависимостей показателя преломления водных растворов C_2H_5OH и C_3H_7OH от концентрации при $t = 23\text{ }^\circ C$, $\lambda = 589\text{ нм}$, $k = 0...100\%$ приведены в табл. 1, а также представлены полиномами третьей степени:

$$n(k) = -0,00000002 \cdot k^3 + 0,000003 \cdot k^2 + 0,0009 \cdot k + 1,3315$$

при достоверности измерений $R^2 = 0,9996$ для растворов C_2H_5OH ;

$$n(k) = -0,00000001 \cdot k^3 + 0,000002 \cdot k^2 + 0,0009 \cdot k + 1,3321$$

при $R^2 = 0,9993$ для растворов C_3H_7OH .

Результаты интерполяции зависимостей $n(k)$ были не хуже $\Delta n \leq 0,0003$.

Таблица 1

C_2H_5OH		C_3H_7OH	
$k, \%$	n	$k, \%$	n
0	1,3321	0	1,3322
10	1,3401	10	1,3418
20	1,3503	20	1,3505
30	1,3612	30	1,3622
40	1,3718	40	1,3720
50	1,3819	50	1,3802
60	1,3927	60	1,3930
70	1,4010	70	1,4009
80	1,4112	80	1,4121
90	1,4218	90	1,4220
100	1,4301	100	1,4312

Графические зависимости исследуемых растворов представлены на рис. 3: *a* — для C_2H_5OH , *б* — для C_3H_7OH , здесь \times — результаты экспериментальных исследований, сплошная линия — кубическая интерполяция.

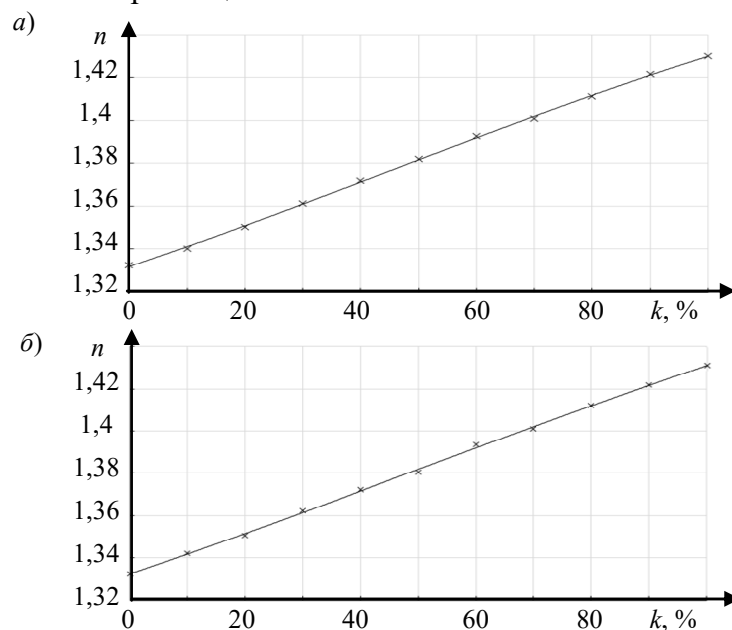


Рис. 3

Экспериментальные результаты измерения зависимостей показателя преломления от температуры водных растворов C_2H_5OH и C_3H_7OH при k , равном 0, 30, 60 и 90 %, $\lambda = 589$ нм в диапазоне $t = 10 \dots 40$ °С приведены в табл. 2 и 3 соответственно, а также представлены полиномами третьей степени:

— для растворов C_2H_5OH :

$$n(t) = -0,0000004 \cdot t^3 + 0,00002 \cdot t^2 - 0,0006 \cdot t + 1,3381$$

при $R^2 = 0,9704$ для $k = 0$;

$$n(t) = -0,00000009 \cdot t^3 - 0,000002 \cdot t^2 - 0,0002 \cdot t + 1,3680$$

при $R^2 = 0,9870$ для $k = 30$ %;

$$n(t) = 0,0000005 \cdot t^3 - 0,00004 \cdot t^2 + 0,0004 \cdot t + 1,3971$$

при $R^2 = 0,9980$ для $k = 60$ %;

$$n(t) = 0,0000002 \cdot t^3 - 0,00001 \cdot t^2 - 0,0003 \cdot t + 1,4314$$

при $R^2 = 0,9989$ для $k = 90$ %;

— для растворов C_3H_7OH :

$$n(t) = -0,0000004 \cdot t^3 + 0,00002 \cdot t^2 - 0,0006 \cdot t + 1,3381$$

при $R^2 = 0,9704$ для $k = 0$ %;

$$n(t) = 0,00000004 \cdot t^3 - 0,000004 \cdot t^2 - 0,0001 \cdot t + 1,3672$$

при $R^2 = 0,9972$ для $k = 30$ %;

$$n(t) = 0,00000007 \cdot t^3 - 0,000002 \cdot t^2 - 0,0003 \cdot t + 1,3979$$

при $R^2 = 0,9984$ для $k = 60$ %;

$$n(t) = 0,00000007 \cdot t^3 - 0,000007 \cdot t^2 - 0,00005 \cdot t + 1,4247$$

при $R^2 = 0,9972$ для $k = 90$ %.

Таблица 2

$k = 0$		$k = 30$ %		$k = 60$ %		$k = 90$ %	
$t, ^\circ C$	n	$t, ^\circ C$	n	$t, ^\circ C$	n	$t, ^\circ C$	n
10	1,3340	10	1,3659	10	1,3981	10	1,4279
15	1,3335	15	1,3641	15	1,3961	15	1,4254
20	1,3329	20	1,3629	20	1,3940	20	1,4232
25	1,3319	25	1,3602	25	1,3907	25	1,4201
30	1,3317	30	1,3591	30	1,3879	30	1,4179
35	1,3312	35	1,3543	35	1,3841	35	1,4150
40	1,3289	40	1,3519	40	1,3822	40	1,4129

Таблица 3

$k = 0$		$k = 30$ %		$k = 60$ %		$k = 90$ %	
$t, ^\circ C$	n	$t, ^\circ C$	n	$t, ^\circ C$	n	$t, ^\circ C$	n
10	1,3340	10	1,3654	10	1,3951	10	1,4235
15	1,3335	15	1,3640	15	1,3939	15	1,4229
20	1,3329	20	1,3632	20	1,3924	20	1,4213
25	1,3319	25	1,3615	25	1,3910	25	1,4201
30	1,3317	30	1,3601	30	1,3901	30	1,4189
35	1,3312	35	1,3589	35	1,3892	35	1,4174
40	1,3289	40	1,3574	40	1,3884	40	1,4159

На рис. 4 приведены графические зависимости показателя преломления от температуры исследуемых проб: *a* — C_2H_5OH , *b* — C_3H_7OH , где кривая 1 соответствует $k=0$, 2 — $k=30$ %, 3 — $k=60$ %, 4 — $k=90$ %; точки — экспериментальные данные, сплошные линии — результаты кубической интерполяции.

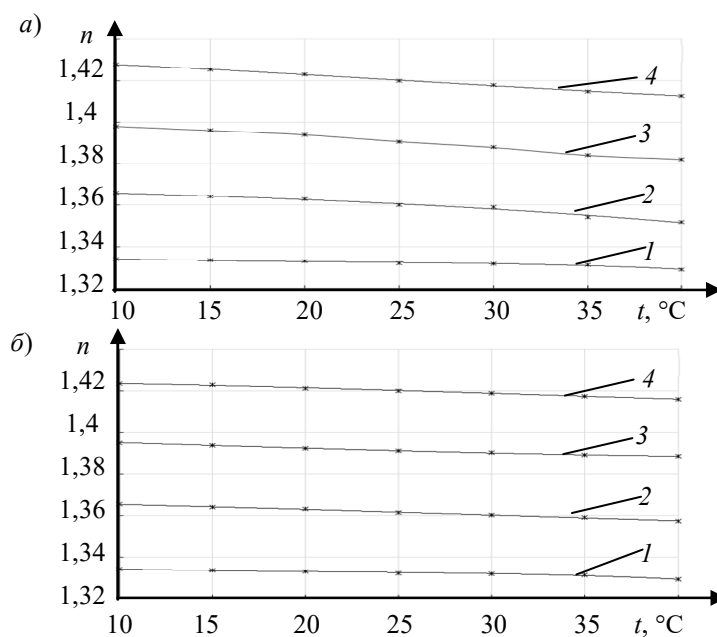


Рис. 4

Заключение. Получены и проанализированы зависимости показателя преломления водных растворов C_2H_5OH и C_3H_7OH от массовой концентрации $k = 0 \dots 100$ % и температуры $t = 10 \dots 40$ °C на длине волны $\lambda = 589$ нм. Экспериментальные результаты полученных зависимостей показателя преломления от концентрации и температуры представлены также полиномами третьей степени. Результаты исследования могут представлять интерес для химической промышленности и оптического приборостроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щелкунов А. В., Васильева Р. Л., Кричевский Л. А. Органическая химия: Учебник. Алма-Ата: Наука, 1975. 235 с.
2. Маркизова Н. Ф., Гребенюк А. Н., Башарин В. А., Бонитенко Е. Ю. Спирты. СПб: Фолиант, 2004. 112 с.
3. Иоффе Б. В. Рефрактометрические методы анализа в химии. Л.: Химия, 1983. 351 с.
4. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
5. Афанасьев В. А. Оптические измерения. М.: Недра, 1968. 263 с.
6. Курлов В. В., Громов О. В., Таюрская И. С., Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Гулиев Р. Б. Применение разработанного рефрактометрического датчика в пищевом производстве // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 2. С. 1—12. DOI: 10.25791/pribor.2.2021.1237.
7. Громов О. В., Майоров Е. Е., Таюрская И. С., Машек А. Ч., Цыганкова Г. А., Удахина С. В. Экспериментальное исследование разработанного автоматизированного рефрактометра для контроля химически агрессивных сред // Научное обозрение. Технические науки. 2021. № 3. С. 21—26.
8. Майоров Е. Е., Курлов В. В., Громов О. В., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В., Таюрская И. С. Применение рефрактометра для контроля напитков торговой марки „LIPTON“ // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 6. С. 170—175. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-170-175.
9. Михальчевский Ю. Ю., Костин Г. А., Майоров Е. Е., Арефьев В. В., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В. Использование рефрактометрии для обеспечения предполетной подготовки воздушных судов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 10. С. 1—7. DOI: 10.25791/pribor.10.2021.1294.
10. Михальчевский Ю. Ю., Костин Г. А., Майоров Е. Е., Курлов В. В., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В. Оптико-электронный контроль противообледенительных жидкостей для обработки воздушных судов // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 10. С. 170—175. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-170-175.

11. Михальчевский Ю. Ю., Костин Г. А., Майоров Е. Е., Арефьев В. В., Хохлова М. В., Удахина С. В. Исследование противообледенительной жидкости оптоэлектронным рефрактометром // Научное приборостроение. 2021. Т. 31, № 4. С. 88—101.
12. Громов О. В., Гулиев Р. Б., Черняк Т. А., Майоров Е. Е., Дагаев А. В., Таюрская И. С. Применение метода полного внутреннего отражения для исследования жидкофазных сред на основе ботулотоксина // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 5. С. 343—349. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-5-343-349.
13. Майоров Е. Е., Хохлова М. В., Громов О. В., Удахина С. В., Арефьев А. В., Таюрская И. С. Теоретическое исследование разработанной автоматизированной измерительной системы // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 12. С. 288—294. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-288-294.
14. Арефьев А. В., Гулиев Р. Б., Громов О. В., Дагаев А. В., Курлов В. В., Майоров Е. Е., Таюрская И. С. Рефрактометрические средства контроля водных растворов тетрахлорэтилена // Научное приборостроение. 2022. Т. 32, № 2. С. 75—83.
15. Рефрактометр Аббе Krüss AR4 // A. Krüss Optronic [Электронный ресурс]: <https://www.nv-lab.ru/catalog_info.php?ID=5853&Variant=1255>, 26.11. 2022.
16. Майоров Е. Е. Призменная рефрактометрия измерения оптических характеристик каустизационного щелока // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Сб. докл. Третьей Всерос. науч. конф., Санкт-Петербург, 18—22 апр. 2022 г. СПб: ГУАП, 2022. С. 59—61. DOI: 10.31799/978-5-8088-1707-4-2022-3.

Сведения об авторах

- Александр Владимирович Арефьев** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной математики; E-mail: aaref@yandex.ru
- Ольга Владимировна Афанасьева** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский горный университет, кафедра системного анализа и управления; E-mail: Ovaf72@gmail.com
- Александр Владимирович Дагаев** — канд. техн. наук; Ивановгородский гуманитарно-технический институт (филиал) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, кафедра математики, информатики и информационных таможенных технологий; доцент; E-mail: adagaev@list.ru
- Виктор Валентинович Курлов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра инноватики и интегрированных систем качества; E-mail: vitek543@rambler.ru
- Евгений Евгеньевич Майоров** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной математики; E-mail: majorov_ee@mail.ru
- Ирина Соломоновна Таюрская** — канд. экон. наук, доцент; Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики, кафедра информационных технологий и математики; E-mail: tis_ivesep@mail.ru

Поступила в редакцию 28.11.2022; одобрена после рецензирования 09.12.2022; принята к публикации 31.05.2023.

REFERENCES

1. Shchelkunov A.V., Vasilyeva R.L., Krichevsky L.A. *Organicheskaya khimiya* (Organic Chemistry), Alma-Ata, 1975, 235 p. (in Russ.)
2. Markizova N.F., Grebenyuk A.N., Basharin V.A., Bonitenko E.Yu. *Spirty* (Alcohols), St. Petersburg, 2004, 112 p. (in Russ.)
3. Ioffe B.V. *Refraktometricheskiye metody analiza v khimii* (Refractometric Methods of Analysis in Chemistry), Leningrad, 1983, 351 p. (in Russ.)
4. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*, Pergamon Press, 1959.
5. Afanas'yev V.A. *Opticheskiye izmereniya* (Optical Measurements), Moscow, 1968, 263 p. (in Russ.)
6. Kurlov V.V., Gromov O.V., Tayurskaya I.S., Maiorov E.E., Arefiev A.V., Guliyev R.B. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2021, no. 2, pp. 1—12, DOI: 10.25791/pribor.2.2021.1237. (in Russ.)
7. Gromov V.O., Mayorov E.E., Tayurskaya I.S., Mashek A.Ch., Tsygankova G.A., Udakhina S.V. *Scientific Review. Technical science*, 2021, no. 3, pp. 21—26. (in Russ.)
8. Maiorov E.E., Kurlov V.V., Gromov O.V., Guliyev R.B., Dagaev A.V., Tayurskaya I.S. News of the Tula State Univer-

- sity. *Technical Sciences*, 2021, no. 6, pp. 170–175, DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-170-175. (in Russ.)
9. Mikhailchevsky Yu.Yu., Kostin G.A., Maiorov E.E., Arefiev A.V., Guliyev R.B., Dagaev A.V. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2021, no. 10, pp. 1–7, DOI: 10.25791/pribor.10.2021.1294. (in Russ.)
 10. Mikhailchevsky Yu.Yu., Kostin G.A., Maiorov E.E., Kurlov V.V., Guliyev R.B., Dagaev A.V. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2021, no. 10, pp. 134–138, DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-170-175. (in Russ.)
 11. Mikhailchevsky Y.Y., Kostin G.A., Maiorov E.E., Arefiev A.V., Khokhlova M.V., Udachina S.V. *Nauchnoe Priborostroenie (Scientific Instrumentation)*, 2021, no. 4(31), pp. 88–101. (in Russ.)
 12. Gromov O.V., Guliyev R.B., Chernyak T.A., Maiorov E.E., Dagaev A.V., Tayurskaya I.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2022, no. 5(65), pp. 343–349, DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-5-343-349. (in Russ.)
 13. Maiorov E.E., Khokhlova M.V., Gromov O.V., Udachina S.V., Arefiev A.V., Tayurskaya I.S. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2021, no. 12, pp. 288–294, DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-288-294. (in Russ.)
 14. Arefiev A.V., Guliyev R.B., Gromov O.V., Dagaev A.V., Kurlov V.V., Maiorov E.E., Tayurskaya I.S. *Nauchnoe Priborostroenie (Scientific Instrumentation)*, 2022, no. 2(32), pp. 75–83. (in Russ.)
 15. https://www.nv-lab.ru/catalog_info.php?ID=5853&Variant=1255. (in Russ.)
 16. Maiorov E.E. *Modelirovaniye i situatsionnoye upravleniye kachestvom slozhnykh sistem (Modeling and Situational Quality Control of Complex Systems)*, Collection of reports of the Third All-Russian Scientific Conference, St. Petersburg, April 18–22, 2022, pp. 59–61, DOI: 10.31799/978-5-8088-1707-4-2022-3. (in Russ.)

Data on authors

- | | | |
|------------------------------|---|---|
| Aleksander V. Arefiev | — | PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics; E-mail: aaref@yandex.ru |
| Olga V. Afanaseva | — | PhD, Associate Professor; St. Petersburg Mining University, Department of System Analysis and Control; E-mail: Ovaf72@gmail.com |
| Alexander V. Dagaev | — | PhD; Ivangorod Humanitarian and Technical Institute, Branch of St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Mathematics, Computer Science and Information Customs Technologies; Associate Professor; E-mail: adagaev@list.ru |
| Viktor V. Kurlov | — | PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Innovation and Integrated Quality Systems; E-mail: vitek543@rambler.ru |
| Evgeny E. Maiorov | — | PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics; E-mail: majorov_ee@mail.ru |
| Irina S. Tayurskaya | — | PhD, Associate Professor; St. Petersburg University of Management Technologies and Economics, Department of Information Technologies and Mathematics; E-mail: tis_ivesep@mail.ru |

Received 28.11.2022; approved after reviewing 09.12.2022; accepted for publication 31.05.2023.