

**ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ЭТИЛОВОГО СПИРТА  
В ЖИДКОФАЗНЫХ СРЕДАХ**Е. Е. МАЙОРОВ<sup>1,3\*</sup>, О. В. АФАНАСЬЕВА<sup>1,2</sup>, В. В. КУРЛОВ<sup>1,3</sup>,  
И. С. ТАЮРСКАЯ<sup>3</sup>, М. В. СОКОЛОВСКАЯ<sup>1</sup><sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,  
Санкт-Петербург, Россия,  
\* [majorov\\_ee@mail.ru](mailto:majorov_ee@mail.ru)<sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия<sup>3</sup> Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики,  
Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация.** Рассматриваются особенности применения спектрофотометрического метода для исследования этилового спирта в некоторых сортах пивной продукции. Методы оптической спектроскопии позволяют количественно и качественно анализировать состав вещества. Эти высокоточные, информативные, а также экономичные методы широко применяются в силу доступности приборного обеспечения, легкости получения и интерпретации информации. Представлен внешний вид спектрофотометра, дана оптическая схема и приведены технические характеристики прибора. Получены и проанализированы спектральные зависимости коэффициента поглощения доли этилового спирта в разных сортах пива. Найдено максимальное поглощение в представленных жидкофазных средах в диапазоне длин волн от 200 до 1100 нм.

**Ключевые слова:** спектрофотометр, этиловый спирт, длина волны излучения, коэффициент поглощения, жидкофазная среда, спектр, двулучевая схема

**Ссылка для цитирования:** Майоров Е. Е., Афанасьева О. В., Курлов В. В., Таюрская И. С., Соколовская М. В. Применение спектрофотометрического метода для исследования содержания этилового спирта в жидкофазных средах // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 6. С. 501—508. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-501-508.

**APPLICATION OF THE SPECTROPHOTOMETRIC METHOD  
FOR STUDYING ETHYL ALCOHOL IN LIQUID PHASE MEDIA**E. E. Maiorov<sup>1,3\*</sup>, O. V. Afanaseva<sup>1,2</sup>, V. V. Kurlov<sup>1,3</sup>, I. S. Tayurskaya<sup>3</sup>, M.V. Sokolovskaya<sup>1</sup><sup>1</sup> St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,  
St. Petersburg, Russia  
[majorov\\_ee@mail.ru](mailto:majorov_ee@mail.ru)<sup>2</sup> St. Petersburg Mining University,  
St. Petersburg, Russia<sup>3</sup> St. Petersburg State University of Management Technologies and Economics,  
St. Petersburg, Russia

**Abstract.** Application of the spectrophotometric method for studying ethyl alcohol in some types of beer products is considered. The optical spectroscopy methods make it possible to conduct a quantitative and qualitative analysis of the composition of a substance. These methods are highly accurate, informative, reliable, as well as economical and widely used due to the availability of instrumentation, ease of obtaining and interpreting information, so the work is relevant and promising. The spectrophotometer appearance is presented, optical scheme and the technical characteristics of the device are given. The spectral dependences of the absorption coefficient of the proportion of ethyl alcohol in different sorts of beer are obtained and analyzed. The maximum absorption in the presented liquid-phase media is found in the wavelength range from 200 to 1100 nm.

**Keywords:** spectrophotometer, ethyl alcohol, radiation wavelength, absorption coefficient, liquid-phase medium, spectrum, two-beam scheme

**For citation:** Maiorov E. E., Afanaseva O. V., Kurlov V. V., Tayurskaya I. S., Sokolovskaya M. V. Application of the spectrophotometric method for studying ethyl alcohol in liquid phase media. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 6. P. 501—508 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-501-508.

**Введение.** Этиловый спирт достаточно широко применяется в пищевом производстве для приготовления слабоалкогольной продукции [1, 2]. Для контроля спирта в этой продукции перспективно применять методы оптической спектроскопии, основанные на поглощении или испускании электромагнитного излучения в результате квантовых и энергетических переходов в структуре вещества [3, 4]. Применяемые спектрофотометры анализируют соответствующие жидкофазные среды в специальных лабораториях, выявляя для каждого элемента свой уникальный набор энергий и интенсивностей переходов между электронными уровнями в атоме [5, 6].

В целом методы оптической спектроскопии позволяют проводить количественный и качественный анализ состава вещества. Эти методы широко применяются в силу доступности приборного обеспечения, легкости получения и интерпретации информации [7, 8].

Использование спектрофотометрических приборов в исследовании жидкофазных сред пищевой промышленности требует достоверных количественных данных по оптическим свойствам как исходных компонентов, так и их водных растворов, включая оптическое поглощение, пропускание и отражение [9, 10]. В известной научной литературе в настоящее время такая информация представлена лишь на качественном уровне. Опубликована информация только о спектрах поглощения ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазонов длин волн для чистых этилового и пропилового спиртов и их водных растворов [11, 12].

Оптическое поглощение в пивной продукции, доля этилового спирта в которой в среднем составляет от 3,5 до 7,0 % об., практически не изучалось. Поэтому задачи исследования оптических свойств в этих средах остаются перспективными и актуальными.

Пивоваренная промышленность в последние годы бурно развивается, используя инновационные технологии, которые позволяют создавать новые продукты, сокращать производственный цикл и снижать себестоимость продукции [13, 14]. А это стимулирует крупных игроков на рынке слабоалкогольной продукции усиливать конкуренцию и проводить более эффективную ценовую политику [15, 16]. Эта тенденция ведущих пивоваров России нарастает, так как изменения в процессе пивоварения могут снизить качество и негативно повлиять на популярность бренда.

Поэтому представляет интерес исследование оптических свойств этилового спирта в пивной продукции. Цель настоящей работы состоит в исследовании спектрофотометрическим прибором доли этилового спирта в некоторых сортах пива.

**Постановка задачи.** Необходимо получить спектральные зависимости коэффициента поглощения доли этилового спирта в разных сортах пива и проанализировать их, а также найти максимальное поглощение в представленных жидкофазных средах в диапазоне длин волн от 200 до 1100 нм.

**Метод и объект исследования.** Исследовались светлые, фильтрованные, пастеризованные сорта пива следующих торговых марок: „Жигулёвское“ (плотность 11 %, содержит от 3,5 до 3,8 % об. этилового спирта; состав — вода, солод ячменный светлый, ячмень и хмель. Производитель АО МПБК „Очаково“), „Ленинградское светлое“ (плотность 11 %, содержит 4 % об. этилового спирта; состав — вода, солод ячменный светлый, ячмень и хмель. Производитель АО „Балтика“), „Жигулёвское“. „Букет Чувашии“ (плотность 11 %, содержит 4,5 % об. этилового спирта; состав — вода, солод ячменный светлый, хмель и хмелепродукты, дрожжи пивные. Производитель ООО «Чебоксарская пивоваренная фирма „Букет Чувашии“»).

Измерение спектров оптического поглощения проводилось на спектрофотометре u-Violet DB марки SIlab (рис. 1).



Рис. 1

Этот спектрофотометр предназначен для работы в ультрафиолетовом и видимом диапазонах спектра (190—1100 нм). Прибор широко используется в биохимических исследованиях, химической и пищевой промышленности, фармацевтическом анализе и производстве, а также экологическом мониторинге. Спектрофотометр может подключаться к периферийным устройствам для анализа результатов и при аварийных отключениях от питания, а также сохранять полученные данные во внутренней памяти.

Этим прибором можно управлять как с помощью встроенной клавиатуры и жидкокристаллического дисплея с интерфейсом на русском языке, так и с использованием программного обеспечения на русском языке через персональный компьютер. Программное обеспечение соответствует требованиям целостности и прослеживаемости данных. Можно выбрать из нескольких режимов измерений спектрофотометра: спектральный, фотометрический, количественный и кинетический.

На рис. 2 представлена оптическая схема спектрофотометра u-Violet DB (1 — дейтериевая лампа; 2 — вольфрамовая галогеновая лампа; 3 — собирающее зеркало; 4—9 — фильтры; 10 — защитная пленка; S1, S2 — щели; 11 — дифракционная решетка; 12, 13 — направляющие зеркала; 14 — полупрозрачная пластина; 15—17 — собирающие линзы; 18 — кюветное отделение; 19, 20 — кремниевые фотодиоды).

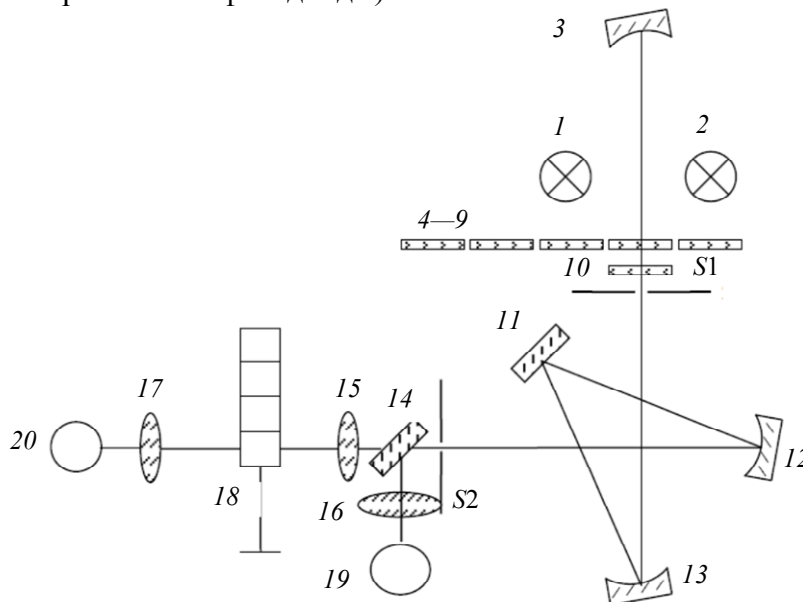


Рис. 2

Спектрофотометр построен по двулучевой схеме с двумя фотодетекторами. В этой схеме опорный и объектный световые пучки приходят каждый к своему фотодетектору [17, 18]. Такое построение позволяет развести по своим каналам объектный и опорный лучи, не совмещая их в один фотоприемник, тем самым увеличивая пространство в кюветном отделении, что

удобно для измерения веществ с любым агрегатным состоянием, чтобы исследуемая поверхность была как можно ближе к источнику излучения [19, 20].

Технические характеристики спектрофотометра приведены в таблице.

**Технические характеристики спектрофотометра u-Violet DB**

Оптическая схема	Двулучевая
Источник излучения	Вольфрамовая галогенная и дейтериевая лампы
Детектор	Кремниевый фотодиод
Спектральный диапазон	190—1100 нм
Ширина щели	1 нм
Погрешность установки длины волны	$\pm 0,3$ нм
Фотометрический диапазон	$-0,3—3,5$ Abs
Уровень рассеянного излучения (220 нм NaI, 360 нм NaNO <sub>2</sub> )	$\leq 0,05$ %T
Фотометрическая погрешность	$\pm 0,002$ Abs (0—0,5 Abs) $\pm 0,004$ Abs (0,5—1 Abs) $\pm 0,3$ % T (0—100 % T)
Фотометрическая воспроизводимость	0,15 % T
Размеры	63×47×21 см
Вес	26 кг

**Экспериментальные результаты.** Образцы исследуемых жидкостей были помещены в кюветы, а сами кюветы устанавливались в канале измерений, напротив прямоугольного окна, как показано на рис. 3. Кюветы были выполнены из кварцевого стекла марки К8 размером 10×8×6 мм.



Рис. 3

Для получения спектральных зависимостей коэффициента поглощения доли этилового спирта в разных пробах объекты подвергались воздействию излучения от разных источников света. Световой пучок проходил через прямоугольное измерительное оконце, попадая на стеклянную стенку кюветы, где находилась измеряемая среда. Далее свет, прошедший через вещество, регистрировался фотоприемной частью прибора.

Спектральные зависимости коэффициента поглощения исследуемых веществ разных марок представлены на рис. 4 (а — „Жигулёвское“; б — „Ленинградское светлое“; в — „Жигулёвское. Букет Чувашии“).

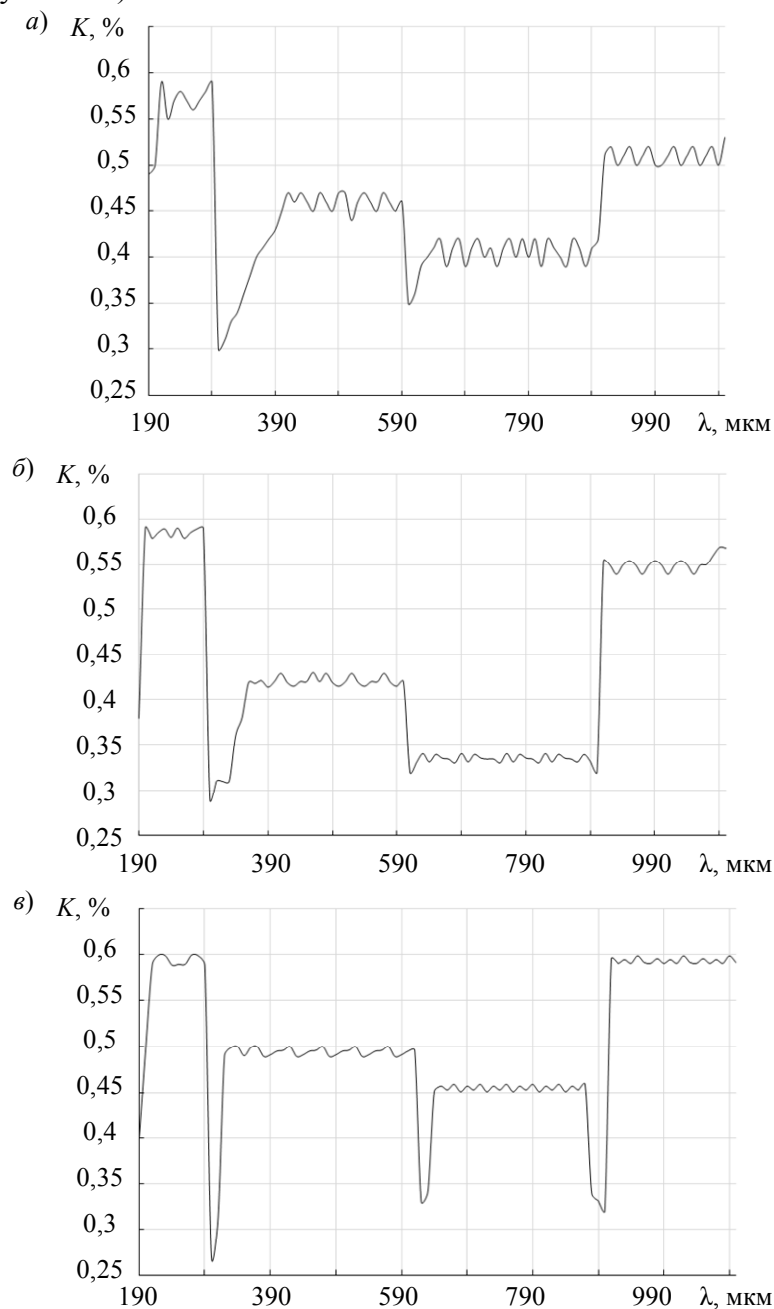


Рис. 4

Полученные данные свидетельствуют о том, что коэффициент поглощения в представленных средах присутствует в области длин волн 190—1100 нм. Кроме того, форма спектральных зависимостей схожа, однако величина коэффициента поглощения у всех разная. Явных спектральных сдвигов кривых не наблюдалось: видимо, это обусловлено хорошей сбалансированностью состава напитков. Спектры у всех проб имели явно выраженную зависимость от длины волны излучения в областях: 190—300, 300—600, 600—900 и 900—1100 нм.

Наибольшее среднее значение коэффициента поглощения зафиксировано для пива „Жигулёвское. Букет Чувашии“ (см. рис. 4, в): максимум среднего значения коэффициента поглощения достигал в диапазонах: на 190—300 нм  $K_{cp} = 60\%$ , на 300—600 нм —  $K_{cp} = 50\%$ , на 600—900 нм —  $K_{cp} = 46\%$ , на 900—1100 нм —  $K_{cp} = 59\%$ . Такие высокие значения

коэффициентов поглощения в веществе обусловлены переходом энергий и интенсивностей между электронными уровнями в атоме.

Исследование состава „Жигулёвское“ показывает, что величины коэффициента поглощения находятся в тех же спектральных диапазонах, что и у „Жигулёвское. Букет Чувашии“ только  $K_{cp}$  были меньше. Соответственно: на 190—300 нм —  $K_{cp} = 57\%$ , на 300—600 нм —  $K_{cp} = 47\%$ , на 600—900 нм —  $K_{cp} = 41\%$ , на 900—1100 нм —  $K_{cp} = 52\%$ .

У „Ленинградское светлое“: на 190—300 нм —  $K_{cp} = 58\%$ , на 300—600 нм —  $K_{cp} = 42,5\%$ , на 600—900 нм —  $K_{cp} = 33,5\%$ , на 900—1100 нм —  $K_{cp} = 55\%$ . Такие спектры вещества свидетельствуют о наличии в представленных выше пробах пивных добавок, отличающихся от специализированных.

**Заключение.** В работе получены и проанализированы спектральные зависимости коэффициента поглощения доли этилового спирта в разных сортах пива. Найдена жидкофазная среда с максимальными и минимальными значениями показателя поглощения в представленных исследуемых образцах в диапазоне длин волн от 200 до 1100 нм. Выполненное исследование представляет интерес для специалистов пищевой промышленности (пивоваренная индустрия) и оптического приборостроения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолаева Г. А. Справочник работника пивоваренного предприятия. СПб: Профессия, 2004. 536 с.
2. Австриевских А. Н., Кантере В. М., Сурков И. В., Ермолаева Е. О. Управление качеством на предприятиях пищевой и перерабатывающей промышленности. Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2007. 268 с.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
4. Афанасьев В. А. Оптические измерения. М.: Недра, 1968. 263 с.
5. Ландсберг Г. С. Оптика. М.: Наука, 1976. 926 с.
6. Креопалова Г. В., Лазарева Н. Л., Пуряев Д. Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
7. Арефьев А. В., Бородинский Ю. М., Майоров Е. Е., Дагаев А. В., Хохлова М. В., Гулиев Р. Б. Разработка экспериментальной методики для фотометрического анализа нефтепродуктов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2020. № 9. С. 1—5. DOI: 10.25791/pribor.09.2020.1202.
8. Майоров Е. Е., Черняк Т. А., Цыганкова Г. А., Машек А. Ч., Константинова А. А., Писарева Е. А. Спектральное исследование текстильного оптического отбеливателя и органического красителя // Научное приборостроение. 2021. Т. 31, № 1. С. 73—83. DOI: 10.18358/np-31-1-e010.
9. Арефьев А. В., Гулиев Р. Б., Майоров Е. Е., Коцкович В. Б., Пушкина В. П., Хохлова М. В. Спектрофотометрия основных дезинфицирующих веществ в ультрафиолетовом диапазоне длин волн // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 4. С. 294—299. DOI 10.17586/0021-3454-2021-64-4-294-299.
10. Майоров Е. Е., Шаламай Л. И., Мендоса Е. Ю., Лампусова В. Б., Оксас Н. С. Спектральные методы и средства исследований оптических свойств стоматологического материала на основе метилметакрилатных смол // Медицинская техника. 2021. № 6. С. 24—27.
11. Колесниченко С. В., Константинова А. А., Машек А. Ч., Майоров Е. Е., Писарева Е. А., Цыганкова Г. А. Фотометрия автомобильных моторных масел // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 6. С. 83—88. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-83-88.
12. Майоров Е. Е., Колесниченко С. В., Константинова А. А., Машек А. Ч., Писарева Е. А., Цыганкова Г. А. Исследование флуктуаций фазы выходного сигнала системы фазовых измерений // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 9. С. 1—6. DOI: 10.25791/pribor.9.2021.1287.
13. Chandra S. The development of a new malt for tastier lagers // *Brewers' Guardian*. 1998. Vol. 127, N 11. P. 13—15.
14. Алексейчева Е. Ю. Факторы повышения конкурентоспособности пивоваренных предприятий // Пиво и напитки. 2005. № 4. С. 8—10.
15. Славская И. Л., Макаров С. Ю., Ильин Е. В. Обзор рынка безалкогольного пива // Пиво и напитки. 2010. № 2(4-6). 120 с.

16. Меледина Т. В. Сырье и вспомогательные материалы в пивоварении. СПб: Профессия, 2003. 304 с.
17. Бородинский Ю. М., Колесниченко С. В., Майоров Е. Е., Константинова А. А., Петрова Е. А., Попова Е. В. Абсорбционная спектроскопия стеклоомывающих жидкостей для автомобилей // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 7. С. 520—526. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-7-520-526.
18. Майоров Е. Е., Афанасьева О. В., Соколовская М. В. Исследование оптических свойств продуктов косметологии спектрофотометром, работающим в дальнем ультрафиолетовом диапазоне длин волн // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып. 8. С. 128—133. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-128-133.
19. Костин Г. А., Черняк Т. А., Майоров Е. Е., Курлов В. В., Таюрская И. С. Спектрофотометрия углеводородного топлива для летательных аппаратов дозвуковой авиации // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып. 8. С. 100—105. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-100-105.
20. Костин Г. А., Черняк Т. А., Майоров Е. Е., Курлов В. В., Таюрская И. С. Исследование оптических свойств авиационных гидравлических жидкостей методом оптической спектроскопии // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып. 8. С. 80—85. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-80-85.

**Сведения об авторах**

- Евгений Евгеньевич Майоров** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), кафедра прикладной математики; Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики, кафедра информационных технологий и математики; E-mail: majorov\_ee@mail.ru
- Ольга Владимировна Афанасьева** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский горный университет, кафедра системного анализа и управления; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), кафедра высшей математики и механики E-mail: Ovaf72@gmail.com
- Виктор Валентинович Курлов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра инноватики и интегрированных систем качества; Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики, кафедра информационных технологий и математики; E-mail: vitek543@rambler.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
- Мария Владиславовна Соколовская** — Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), старший преподаватель, прикладной математики, E-mail: mary@guap.ru

Поступила в редакцию 14.11.2022; одобрена после рецензирования 25.11.2022; принята к публикации 27.04.2023.

**REFERENCES**

1. Ermolaeva G.A. *Spravochnik rabotnika pivovarennogo predpriyatiya* (Brewery Worker's Handbook), St. Petersburg, 2004, 536 p. (in Russ.)
2. Avstriyevskikh A.N., Kantere V.M., Surkov I.V., Ermolayeva E.O. *Upravleniye kachestvom na predpriyatiyakh pishchevoy i pererabatyvayushchey promyshlennosti* (Quality Management in Food and Processing Industries), Novosibirsk, 2007, 268 p. (in Russ.)
3. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*, Pergamon Press, 1959.
4. Afanas'yev V.A. *Opticheskiye izmereniya* (Optical Measurements), Moscow, 1968, 263 p. (in Russ.)
5. Landsberg G.S. *Optika* (Optics), Moscow, 1976, 926 p. (in Russ.)
6. Kreopalova G.V., Lazareva N.L., Puryaev D.T. *Opticheskiye izmereniya* (Optical Measurements), Moscow, 1987, 264 p. (in Russ.)
7. Arefiev A.V., Borodyansky Yu.M., Majorov E.E., Dagaev A.V., Khokhlova M.V., Guliev R.B. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2020, no. 9, pp. 1–5, DOI: 10.25791/pribor.09.2020.1202. (in Russ.)
8. Maiorov E.E., Chernyak T.A., Tsygankova G.A., Mashek A.C., Konstantinova A.A., Pisareva E.A. *Nauchnoe Priborostroenie* (Scientific Instrumentation), 2021, no. 1(31), pp. 73–83, DOI: 10.18358/np-31-1-e010. (in Russ.)
9. Arefiev A.V., Guliev R.B., Maiorov E.E., Kotskovich V.B., Pushkina V.P., Khokhlova M.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 4(64), pp. 294–299. (in Russ.)
10. Maiorov E.E., Shalamay L.I., Mendoza E.Yu., Lampusova V.B., Oksas N.S. *Biomedical Engineering*, 2021, no. 6, pp. 24–27. (in Russ.)
11. Kolesnichenko S.V., Konstantinova A.A., Mashek A.Ch., Maiorov E.E., Pisareva E.A., Tsygankova G.A. *News of the*

- Tula State University. Technical Sciences*, 2021, no. 6, pp. 83–88, DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-83-88. (in Russ.)
12. Maiorov E.E., Kolesnichenko S.V., Konstantinova A.A., Mashek A.Ch., Pisareva E.A., Tsygankova G.A. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2021, no. 9, pp. 1–6, DOI: 10.25791/pribor.9.2021.1287 (in Russ.)
  13. Chandra S. *Brewers' Guardian*, 1998, no. 11(127), pp. 13–15.
  14. Alekseycheva E.Yu. *Beer and drinks*, 2005, no. 4, pp. 8–10. (in Russ.)
  15. Slavskaya I.L., Makarov S.Yu., Ilyin E.V. *Beer and drinks*, 2010, no. 2(4-6). (in Russ.)
  16. Meledina T.V. *Syr'ye i vspomogatel'nyye materialy v pivovarenii* (Raw Materials and Auxiliary Materials in Brewing), St. Petersburg, 2003, 304 p. (in Russ.)
  17. Borodyansky Yu.M., Kolesnichenko S.V., Maiorov E.E., Konstantinova A.A., Petrova E.A., Popova E.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2022, no. 7(65), pp. 520–526, DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-7-520-526. (in Russ.)
  18. Maiorov E.E., Afanasyeva O.V., Sokolovskaya M.V. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2022, no. 8, pp. 128–133, DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-128-133. (in Russ.)
  19. Kostin G.A., Chernyak T.A., Maiorov E.E., Kurlov V.V., Tayurskaya I.S. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2022, no. 8, pp. 100–105, DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-100-105. (in Russ.)
  20. Kostin G.A., Chernyak T.A., Maiorov E.E., Kurlov V.V., Tayurskaya I.S. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2022, no. 8, pp. 80–85, DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-80-85. (in Russ.)

#### Data on authors

- |                              |  |
|------------------------------|--|
| <b>Evgeny E. Maiorov</b>     | — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics, St. Petersburg State University of Management Technologies and Economics, Department of Information Technology and Mathematics, E-mail: majorov_ee@mail.ru                        |
| <b>Olga V. Afanaseva</b>     | — PhD, Associate Professor; St. Petersburg Mining University, Department of System Analysis and control; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics, E-mail: Ovaf72@gmail.com   |
| <b>Viktor V. Kurlov</b>      | — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Management Technologies and Economics, Department of Information Technology and Mathematics, E-mail: vitek543@rambler.ru |
| <b>Irina S. Tayurskaya</b>   | — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Management Technologies and Economics, Department of Information Technology and Mathematics, E-mail: tis_ivesep@mail.ru   |
| <b>Maria V. Sokolovskaya</b> | St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics; Senior Lecturer; E-mail: mary@guap.ru   |

Received 14.11.2022; approved after reviewing 25.11.2022; accepted for publication 27.04.2023.