

УДК 544.07

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.45.2.031](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.45.2.031)

Разработка акустической измерительной системы анализа состава веществ

А.В. Бочкарев✉, М.А. Любимова, К.С. Попов

*Самарский государственный технический университет, Самара,
Российская Федерация*

Резюме. Актуальность исследования обусловлена проблемой несвоевременности анализа состава жидких смесей при их изготовлении предприятиями пищевой, химической и нефтеперерабатывающей промышленности. Традиционный метод такого анализа проводится после формирования партии продукции, из-за чего предприятия терпят издержки, связанные с утилизацией брака партии продукции. Данная статья посвящена разработке акустической измерительной системы анализа состава жидких веществ, способной использоваться для анализа различной жидкой продукции в промышленности в непрерывном режиме при транспортировке этой продукции по внутренней системе промышленного трубопровода, что позволяет выявить брак до формирования партии продукции, тем самым сократить издержки на утилизацию. Система, встраиваемая в трубопровод, содержит два измерительных канала, включающих два пьезоэлектрических приемника и один, общий для двух каналов, пьезоэлектрический излучатель. В рамках данной работы производится отбор оборудования на основе анализа повторяемости результатов исследований, в частности, рассматривается возможность применения того или иного генератора, формирующего возбуждающие сигналы для пьезоэлектрического излучателя. Исследуется возможность использования возбуждающих сигналов различной формы и/или длительности, производится оценка повторяемости на основании линейного коэффициента корреляции между несколькими повторениями экспериментов с одним типом возбуждающего сигнала. Анализируется необходимость наличия двух измерительных каналов. Материалы представляют практическую ценность для предприятий, выпускающих жидкую продукцию, а также для производителей аналитического оборудования.

Ключевые слова: акустический метод измерения, пьезоэлектрический преобразователь, аналитические исследования, повторяемость результатов, линейный коэффициент корреляции.

Для цитирования: Бочкарев А.В., Любимова М.А., Попов К.С. Разработка акустической системы анализа состава веществ. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2024;12(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1569> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.45.2.031

Developing of an acoustic measuring system for analyzing the composition of substances

A.V. Bochkarov✉, M.A. Lyubimova, K.S. Popov

Samara State Technical University, Samara, the Russian Federation

Abstract. The relevance of the study is due to the problem of untimely analysis of the composition of liquid mixtures during their production by enterprises of the food, chemical and oil refining industries. The traditional method of such analysis is carried out after the formation of a batch of products, which is why enterprises incur costs associated with the disposal of defective batches of products. This article is devoted to the development of an acoustic measuring system for analyzing the composition of liquid substances, capable of being used to analyze various liquid products in industry in a continuous mode when transporting these products through the internal industrial pipeline system, which makes it possible to identify defects before the formation of a batch of products, thereby reducing disposal costs. The

sounded system, built into the pipeline, contains two measuring channels, including two piezoelectric receivers and one piezoelectric emitter, common to the two channels. As part of this work, equipment is selected based on an analysis of the repeatability of research results, in particular, the possibility of using one or another generator that generates exciting signals for a piezoelectric emitter is considered. The possibility of using excitation signals of various shapes and/or durations is investigated, and repeatability is assessed based on the linear correlation coefficient between several repetitions of experiments with the same type of excitation signal. The need for two measuring channels is analyzed. The materials are of practical value for enterprises producing liquid products, as well as for manufacturers of analytical equipment.

Keywords: acoustic measurement method, piezoelectric transducer, analytical studies, repeatability of results, linear correlation coefficient.

For citation: Bochkarev A.V., Lyubimova M.A., Popov K.S. Developing of an acoustic measuring system for analyzing the composition of substances. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1569> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.45.2.031 (In Russ.).

Введение

Анализ качества партии продукции осуществляется предприятиями пищевой [1, 2], фармацевтической [3], химической [4] и нефтяной [5] промышленности. В настоящее время готовность партии продукции определяется стандартными методами [6, 7], среди которых наиболее используемым можно считать хроматографию [8]. Анализ с помощью таких методов производится после формирования партии продукции, и в случае ее несоответствия установленным нормам, партия уничтожается целиком, что приводит к финансовым и экологическим издержкам [9].

В этой связи актуальным является вопрос разработки новых методов аналитических исследований, предполагающих возможность проведения анализа в непрерывном режиме при транспортировке жидкой продукции по внутренней системе промышленного трубопровода, что позволяет выявить брак до формирования партии продукции, тем самым сократить издержки на утилизацию. Одним из возможных путей реализации такого метода является применение пар акустических излучателей-приемников, которые используются для записи сигналов ультразвука, пропущенных через жидкую продукцию, и по характеристикам полученных сигналов судят о качестве продукции в момент измерения [10]. В качестве одной из характеристик таких сигналов может выступать частотный спектр [11]. При этом требуется излучать приемником сигнал, содержащий различные частоты в некотором диапазоне, а приемник должен быть способен принимать сигналы в том же диапазоне частот, в котором работает излучатель. Вычисляя частотный спектр сигнала, полученного с приемника (спектр пропускания) возможно судить о составе анализируемой жидкости (у разных жидких веществ свой акустический спектр пропускания [12]) и по составу определять качество продукции. В настоящее время не выявлено четкой зависимости между параметрами частотного спектра пропускания акустического сигнала и составом жидкости, в связи с этим требуются наукоемкие исследования, направленные на выявление такого рода зависимости. Настоящая работа посвящена первичному этапу подобного исследования, в рамках которого анализу подвергается дистиллированная вода (как опорная жидкость для дальнейших исследований), выявляется возможность получения повторяемых результатов при использовании различного оборудования.

Материалы и методы

Для реализации акустического метода предложена акустическая измерительная система (Рисунок 1, где ИПП – излучающий пьезоэлектрический преобразователь, ПП1, ПП2 – приемные пьезоэлектрические преобразователи). В рамках исследования было решено рассмотреть с целью выбора наиболее подходящего три типа сигналов, возбуждающих излучающий пьезоэлектрический преобразователь, которые содержали бы различные частоты – прямоугольные импульсы, гармонический сигнал с непрерывно меняющейся частотой, а также серия гармонических сигналов различной частоты.

Для генерации прямоугольных импульсов были использованы два генератора – Г5-54 и Juntek GDS2900, для генерации синусоидальных сигналов – генератор GFG-8219A. Для формирования и записи ультразвуковых сигналов использовались 3 пьезоэлектрических преобразователя GT300 – один в качестве излучателя, два в качестве приемников. Пьезоэлектрические преобразователи были установлены в кубический резервуар, предназначенный для размещения в нем исследуемой жидкости, причем один приемный пьезоэлектрический преобразователь находился соосно с излучающим (оба вмонтированы в боковые стенки резервуара), а второй – перпендикулярно излучающему (вмонтирован в съемную крышку резервуара). Предельная вместимость резервуара – 41 мл. Для усиления сигналов приемных пьезоэлектрических преобразователей использовались 2 согласующих усилителя А-line ПАЭФ-014. Усиленные сигналы с приемных пьезоэлектрических преобразователей были записаны системой сбора данных А-line 32D.

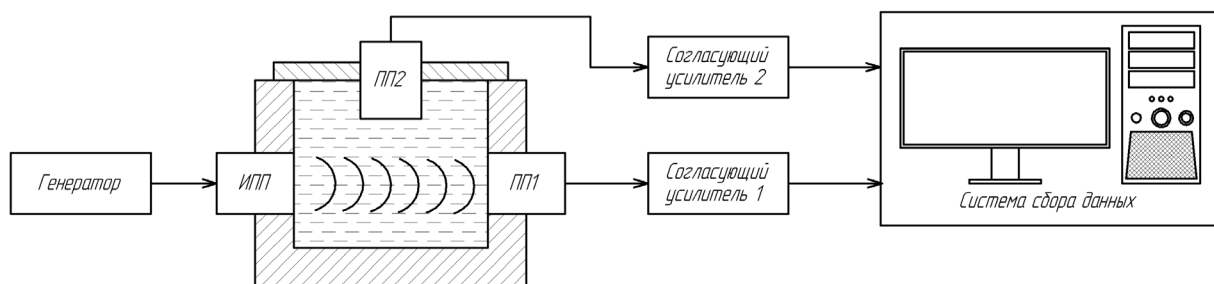


Рисунок 1 – Структурная схема измерительной системы
 Figure 1 – Block diagram of the measuring system

В системе сбора данных использован полосовой фильтр, пропускающий частоты в диапазоне 30...500 кГц, частота дискретизации встроенного в систему АЦП – 1 МГц. В качестве исследуемой жидкости использована дистиллированная вода. Излучающий пьезоэлектрический преобразователь возбуждался тремя типами сигналов: прямоугольный импульс длительностью 2,5...12,5 мкс, гармонический сигнал с непрерывно меняющейся частотой от 30 до 500 кГц, серия гармонических сигналов частотой от 30 до 500 кГц. Осуществлялось по 3 повторения эксперимента для каждого типа сигнала.

Результаты

Цель эксперимента – выявить наиболее подходящий тип входного ультразвукового сигнала для исследования состава жидкостей. Для достижения цели были выполнены следующие задачи:

1) осуществить запись пропущенных через дистиллированную воду ультразвуковых сигналов различного типа (по 3 повторения): прямоугольный импульс,

гармонический сигнал с непрерывно меняющейся частотой, серия гармонических сигналов различной частоты;

2) определить, при каком из типов сигналов наблюдается наибольшая повторяемость спектра пропущенного сигнала.

В ходе эксперимента резервуар заполнялся дистиллированной водой и осуществлялась запись пропущенных через нее ультразвуковых сигналов. При записи сигналов (Рисунок 2), полученных при подаче на пьезоэлектрический излучатель прямоугольных импульсов и серии гармонических сигналов (последовательно) запись осуществлялась порядка 2-3 секунд для каждой длительности импульса или частоты, соответственно. При использовании сигнала с непрерывно меняющейся частотой запись осуществлялась непрерывно. В качестве результата экспериментов использовался частотный спектр записанных сигналов. Для формирования спектра серии гармонических сигналов различной частоты определялся спектр каждого из таких сигналов по-отдельности, после чего формировалась суперпозиция полученных спектров, причем из спектра каждого сигнала частоты f выбиралась лишь область от $f-10$ кГц до $f+10$ кГц. Для остальных типов сигналов частотный спектр вычислялся непосредственно, без дополнительной предварительной обработки. Примеры полученных спектров представлены на Рисунке 2. На рисунке введены следующие обозначения: а – для импульсного сигнала 12,5 мкс (Г5-54), б – для сигнала с непрерывно меняющейся частотой, в – для суперпозиции серии гармонических сигналов.

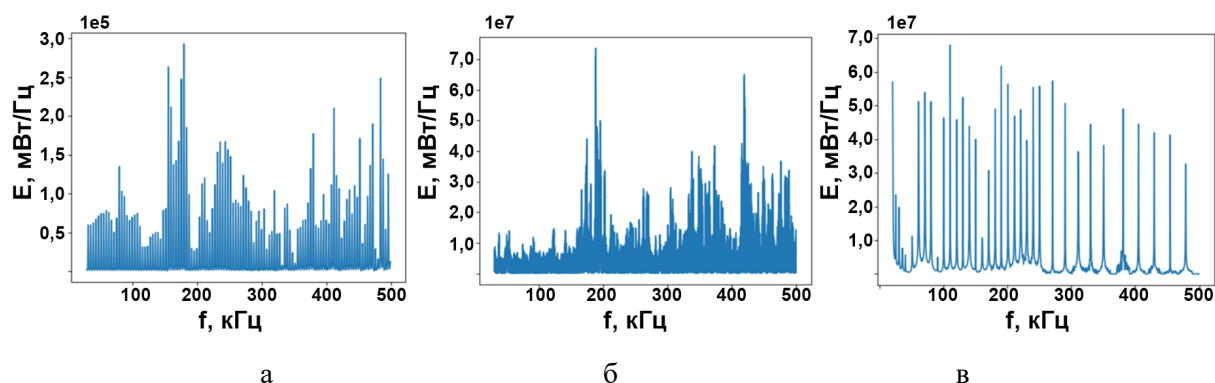


Рисунок 2 – Примеры полученных частотных спектров различных сигналов
Figure 2 – Examples of obtained frequency spectra of various signals

Для определения повторяемости между повторениями в результатах эксперимента был использован линейный коэффициент корреляции (коэффициент корреляции Пирсона) [11]:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \sum_{i=1}^M (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^M (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

где x_i, y_i – значения из двух сравниваемых выборок; \bar{x}, \bar{y} – математические ожидания в сравниваемых выборках.

Поскольку значения r_{xy} оказались различными для разных сочетаний повторений (3 сочетания), также было решено оценить в процентном выражении среднеквадратическое отклонение (СКО) между рассчитанными коэффициентами корреляции для каждого типа сигналов:

$$\text{СКО} = \frac{\sigma}{\bar{r}_{xy}} 100\%, \quad (2)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение выборки коэффициентов корреляции; \bar{r}_{xy} – математическое ожидание выборки коэффициентов корреляции.

Поскольку наименьшее значение r_{xy} для различных сочетаний повторений характеризует наихудший результат эксперимента, оно может служить в качестве главного показателя повторяемости результатов, и в идеальном случае оно должно составлять 1,0. В то же время, большой разброс r_{xy} для различных сочетаний повторений может указывать на нестабильность результатов, поэтому вторым критерием оценки повторяемости служит СКО в процентном выражении, в идеальном случае оно должно составлять 0%. Согласно описанным критериям была сформирована Таблица 1, в которой результаты для каждого канала в отдельности упорядочены сперва по убыванию минимального значения r_{xy} , а затем по возрастанию СКО. В Таблице 1 используется сокращение НМЧ – непрерывно меняющаяся частота.

Таблица 1 – Результаты исследования с дистиллированной водой
Table 1 – Results of the study with distill water

Канал 1				Канал 2			
Тип сигнала	r_{xy}			Тип сигнала	r_{xy}		
	Мин.	Сред.	СКО, %		Мин.	Сред.	СКО, %
Г5-54, 1000 мкс	0,860	0,871	1,152	Г5-54, 3 мкс	0,958	0,973	1,160
Г5-54, 8 мкс	0,856	0,884	2,376	Г5-54, 10 мкс	0,921	0,950	2,483
Г5-54, 3 мкс	0,844	0,854	0,831	Г5-54, 8 мкс	0,914	0,943	2,282
Г5-54, 4 мкс	0,828	0,838	1,220	Г5-54, 4 мкс	0,838	0,876	3,059
Juntek, 7,14 мкс	0,815	0,872	8,589	Г5-54, 6 мкс	0,768	0,811	5,002
Г5-54, 10 мкс	0,813	0,864	4,322	Г5-54, 2 мкс	0,746	0,792	5,104
Juntek, 4,17 мкс	0,770	0,839	11,574	Г5-54, 0,8 мкс	0,666	0,726	8,889
Г5-54, 20 мкс	0,767	0,817	6,548	Juntek, 2,5 мкс	0,638	0,687	6,267
Г5-54, 6 мкс	0,755	0,806	7,964	Г5-54, 400 мкс	0,503	0,540	7,188
Juntek, 12,5 мкс	0,751	0,823	13,154	Г5-54, 1000 мкс	0,494	0,520	5,793
Г5-54, 50 мкс	0,680	0,709	2,947	Сигнал НМЧ	0,456	0,499	8,122
Г5-54, 400 мкс	0,672	0,732	6,125	Juntek, 7,14 мкс	0,454	0,574	23,829
Г5-54, 0,3 мкс	0,562	0,570	0,928	Juntek, 12,5 мкс	0,403	0,474	14,437
Г5-54, 0,8 мкс	0,465	0,556	11,821	Juntek, 4,17 мкс	0,371	0,499	44,389
Г5-54, 2 мкс	0,435	0,481	7,128	Серия гармоник	0,327	0,394	12,807
Сигнал НМЧ	0,425	0,475	7,591	Г5-54, 50 мкс	0,311	0,420	36,424
Серия гармоник	0,420	0,476	10,602	Г5-54, 0,3 мкс	0,292	0,449	46,706
Г5-54, 0,1 мкс	0,411	0,477	9,930	Г5-54, 0,1 мкс	0,284	0,335	11,975
Г5-54, 100 мкс	0,357	0,469	22,495	Г5-54, 20 мкс	0,268	0,392	23,032
Juntek, 2,5 мкс	0,357	0,568	32,204	Г5-54, 100 мкс	0,101	0,325	79,646

Второе экспериментальное исследование системы направлено на установление повторяемости результатов при анализе разработанной системой смесей веществ с дистиллированной водой. В качестве таких веществ были выбраны сахар и соль, а также их комбинация: по 2–6 г сахара и/или соли были растворены в 35–39 мл дистиллированной воды для получения анализируемых смесей. При анализе использованы сигналы из Таблицы 1, показавшие наиболее стабильные результаты:

прямоугольные импульсы генератора Г5-54 длительностью 3, 4, 8 и 10 мкс. Результаты представлены в Таблице 2.

Таблица 2 – Результаты исследования различных смесей
Table 2 – Results of the study of mixtures of substances

Канал 1				Канал 2			
10 мкс							
Смесь	r_{xy}			Смесь	r_{xy}		
	Мин,	Сред,	СКО, %		Мин,	Сред,	СКО, %
Вода 37,1 мл + соль 4,1 г	0,794	0,867	10,004	Вода 35,3 + сахар 2,2 + соль 2,1	0,993	0,996	0,196
Вода 35,2 мл + соль 2,2 г	0,788	0,813	2,466	Вода 37,1 мл + соль 4,1 г	0,884	0,923	5,745
Вода 37,8 мл + сахар 5,4 г	0,783	0,853	10,945	Вода 35,1 мл + сахар 2,1 г	0,868	0,909	4,659
Вода 35,1 мл + сахар 2,1 г	0,754	0,761	1,356	Вода 37,8 мл + сахар 5,4 г	0,752	0,793	4,683
Вода 35,3 мл + сахар 2,2 г + соль 2,1 г	0,655	0,697	4,566	Вода 35,2 мл + соль 2,2 г	0,689	0,737	8,717
8 мкс							
Вода 35,1 мл + сахар 2,1 г	0,788	0,828	3,607	Вода 35,3 мл + сахар 2,2 г + соль 2,1 г	0,995	0,997	0,217
Вода 35,2 мл + соль 2,2 г	0,770	0,790	2,726	Вода 35,1 мл + сахар 2,1 г	0,917	0,940	2,520
Вода 37,8 мл + сахар 5,4 г	0,741	0,812	8,185	Вода 35,2 мл + соль 2,2 г	0,795	0,856	5,448
Вода 37,1 мл + соль 4,1 г	0,578	0,651	7,938	Вода 37,8 мл + сахар 5,4 г	0,705	0,799	8,949
Вода 35,3 мл + сахар 2,2 г + соль 2,1 г	0,461	0,610	18,140	Вода 37,1 мл + соль 4,1 г	0,690	0,791	16,953
3 мкс							
Вода 35,3 + сахар 2,2 + соль 2,1	0,783	0,813	2,741	Вода 35,3 + сахар 2,2 + соль 2,1	0,859	0,879	2,381
Вода 35,2 мл + соль 2,2 г	0,756	0,791	3,211	Вода 37,8 мл + сахар 5,4 г	0,794	0,822	2,973
Вода 37,1 мл + соль 4,1 г	0,664	0,685	3,787	Вода 35,1 мл + сахар 2,1 г	0,791	0,819	4,761
Вода 35,1 мл + сахар 2,1 г	0,623	0,650	4,733	Вода 35,2 мл + соль 2,2 г	0,777	0,811	3,395
Вода 37,8 мл + сахар 5,4 г	0,605	0,708	10,297	Вода 37,1 мл + соль 4,1 г	0,426	0,637	23,700
4 мкс							
Вода 35,1 мл + сахар 2,1 г	0,887	0,906	1,921	Вода 37,8 мл + сахар 5,4 г	0,969	0,982	1,042
Вода 37,8 мл + сахар 5,4 г	0,778	0,853	12,099	Вода 37,1 мл + соль 4,1 г	0,939	0,957	2,581

Таблица 2 (продолжение)

Table 2 (continued)

Вода 35,3 мл + сахар 2,2 г + соль 2,1 г	0,709	0,725	1,508	Вода 35,1 мл + сахар 2,1 г	0,936	0,947	0,828
Вода 35,2 мл + соль 2,2 г	0,691	0,752	5,725	Вода 35,3 мл + сахар 2,2 г + соль 2,1 г	0,606	0,766	16,695
Вода 37,1 мл + соль 4,1 г	0,670	0,738	6,497	Вода 35,2 мл + соль 2,2 г	0,536	0,714	26,174

Обсуждение

Согласно данным Таблицы 1 можно видеть, что некоторые типы сигналов обеспечивают высокое значение минимального $r_{xy} > 0,8$, что указывает на наличие повторяемости результатов и возможность применения акустического метода для дальнейших исследований жидкостей. Кроме того, импульсный тип сигнала различной длительности, как правило, обеспечивает лучшие результаты, чем другие типы сигналов. Генератор Juntek уступает Г5-54 в повторяемости результатов при сопоставимой длительности импульса. Перекрестно анализируя верхние строки Таблицы 1 для первого и второго каналов можно заключить, что наилучшим типом сигнала является воспроизводимый генератором Г5-54 прямоугольный импульс длительностью 3 мкс: для первого канала минимальное значение r_{xy} при использовании такого сигнала практически идентичного расположенным выше результатам (1000 и 8 мкс), но меньше СКО; для второго канала как минимальное значение r_{xy} , так и СКО оказываются лучшими среди всех вариантов сигналов. По данным Таблицы 2 можно видеть частичное подтверждение озвученных результатов, но повторяемость для смесей веществ с дистиллированной водой оказывается, как правило, ниже, чем при исследовании дистиллированной воды без примесей. По Таблице 2 импульсный сигнал 3 мкс обеспечивает меньшую повторяемость, чем 8 и 10 мкс. В то же время можно видеть, что второй канал системы обеспечивает большую повторяемость в сравнении с первым.

Заключение

Таким образом, проведенное исследование показывает, что на дальнейших этапах необходимо использовать генератор Г5-54 в качестве источника возбуждающих сигналов для пьезоэлектрического излучателя в виде прямоугольных импульсов длительностью 8 мкс. Дальнейшие исследования должны быть направлены на уточнение повторяемости результатов при исследовании смесей веществ с дистиллированной водой.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Schipilliti L., Dugo P., Bonaccorsi I., Mondello L. Headspace-solid phase microextraction coupled to gas chromatography–combustion-isotope ratio mass spectrometer and to enantioselective gas chromatography for strawberry flavoured food quality control. *Journal of Chromatography A*. 2011;1218(42):7481–7486. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2011.07.072>
2. Яновская А.В., Калякина О.П., Кузьмин А.П., Захарченко П.В. Применение инструментальных методов анализа в обнаружении фальсификации спиртных

- напитков. *Вестник КрасГАУ*. 2021;(2):161–166. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-2-161-166>
- Yanovskaya A.V., Kalyakina O.P., Kuzmin A.P., Zakharchenko P.V. Application of instrumental analysis methods in detecting alcoholic beverages falsification. *Vestnik KrasGAU = Bulletin of KSAU*. 2021;(2):161–166. (In Russ.). <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-2-161-166>
3. Sawicki E., Hillebrand M.J., Rosing H., Schellens J.H.M., Nuijen B., Beijnen J.H. Validation of a liquid chromatographic method for the pharmaceutical quality control of products containing elacridar. *Journal of Pharmaceutical Analysis*. 2016;6(4):268–275. <https://doi.org/10.1016/j.jpha.2016.04.005>
 4. Lahon D., Bora P.K., Sarmah J., Bhuyan M., Haldar S. A high performance thin layer chromatography (HPTLC) method for the quality assessment of citronella oil: application in commercial sample analysis. *Natural Product Research*. 2023. <https://doi.org/10.1080/14786419.2023.2257355>
 5. Исаев И.З., Исаева М.С. Фракционный состав нефти. В сборнике: *Инновационная траектория современных исследований: Сборник статей Международной научно-практической конференции, 25 сентября 2023 года, Петрозаводск, Россия*. Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука»; 2023. С. 145–151.
Isaev I.Z., Isaeva M.S. Fractional composition of oil. In: *Innovatsionnaya traektoriya sovremennykh issledovaniy: Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 25 September 2023, Petrozavodsk, Russia*. Petrozavodsk: International Center for Scientific Partnership «New Science»; 2023. P. 145–151. (In Russ.).
 6. Christian G.D., Dasgupta P.K., Schug K.A. *Analytical Chemistry*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons; 2013. 848 p.
 7. Taverniers I., De Loose M., Van Bockstaele E. Trends in quality in the analytical laboratory. II. Analytical method validation and quality assurance. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2004;23(8):535–552. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2004.04.001>
 8. Smith I. *Chromatographic and Electrophoretic Techniques. Volume I – Chromatography*. Bath: Elsevier; 2013. 1100 p.
 9. Shewhart W.A. *Economic Control of Quality of Manufactured Product*. Milwaukee, WI: American Society for Quality Control; 1980. 501 p.
 10. Awad T.S., Moharram H.A., Shaltout O.E., Asker D., Youssef M.M. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Research International*. 2012;48(2):410–427. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.05.004>
 11. Zhang X.-D. *Modern Signal Processing*. Berlin: De Gruyter; 2023. 601 p. <https://doi.org/10.1515/9783110475562>
 12. Tzanakis I., Lebon G.S.B., Eskin D.G., Pericleous K.A. Characterizing the cavitation development and acoustic spectrum in various liquids. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2017;34:651–662. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.034>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бочкарев Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, Самарский государственный технический университет, Самара, Российская Федерация.

e-mail: bochkarevpubliciit@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1615-5659>

Andrey V. Bochkarev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Samara State Technical University, Samara, the Russian Federation.

Любимова Мария Андреевна, студентка бакалавриата, Самарский государственный технический университет, Самара, Российская Федерация.

e-mail: mashalubimova100@gmail.com

Maria A. Lyubimova, undergraduate student, Samara State Technical University, Samara, the Russian Federation.

Попов Константин Сергеевич, студент бакалавриата, Самарский государственный технический университет, Самара, Российская Федерация.

e-mail: kostya.king05@mail.ru

Konstantin S. Popov, undergraduate student, Samara State Technical University, Samara, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 03.05.2024; одобрена после рецензирования 15.05.2024; принята к публикации 27.05.2024.

The article was submitted 03.05.2024; approved after reviewing 15.05.2024; accepted for publication 27.05.2024.