

EDN: UEVNMS

УДК 537.86: 621.3.09

Experimental Study of the Electromagnetic Environment Taking Into Account the Superposition of Electromagnetic Waves

Evgeny V. Titov and Elena B. Osmushkina*
*Polzunov Altai State Technical University
Barnaul, Russian Federation*

Received 09.03.2023, received in revised form 15.05.2023, accepted 10.08.2023

Abstract. The article considers the issues of assessing the electromagnetic environment in the premises of the agro-industrial complex with an installation for irrigation of agricultural crops. The results of experimental measurements of the energy flux density from the investigated installation are presented. Zones with a high energy flux density exceeding the maximum permissible levels have been identified. The expressions used to determine the intensity of the resulting electromagnetic wave are indicated. A step-by-step process of obtaining the resulting wave for each side of the installation by superimposing the amplitude values of the intensity of the electromagnetic field for the selected frequency components is given. The practical value of the considered technique of applying electromagnetic waves in a wide frequency range is substantiated for further use of the results obtained in assessing the state of the electromagnetic environment and ensuring the safe stay of people near the investigated installation.

Keywords: electromagnetic field intensity, experimental measurements, irrigation plant, the technique of applying electromagnetic waves, computer simulation, electromagnetic environment.

Citation: Titov, E.V., Osmushkina, E. B. Experimental study of the electromagnetic environment taking into account the superposition of electromagnetic waves. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2023, 16(6), 658–666.
EDN: UEVNMS



Экспериментальное исследование электромагнитной обстановки с учетом наложения электромагнитных волн

Е. В. Титов, Е. Б. Осьмушкина

*Алтайский государственный технический университет
имени И. И. Ползунова
Российская Федерация, Барнаул*

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы оценки электромагнитной обстановки в помещении АПК с установкой для орошения сельскохозяйственных культур. Представлены результаты экспериментальных измерений плотности потока энергии от исследуемой установки. Определены зоны с высоким значением плотности потока энергии, превышающим предельно допустимые уровни. Указаны выражения, используемые для определения интенсивности результирующей электромагнитной волны. Приведен поэтапный процесс получения результирующей волны для каждой стороны установки путем наложения амплитудных значений интенсивности электромагнитного поля для выбранных частотных составляющих. Обоснована практическая ценность рассмотренной методики наложения электромагнитных волн в широком частотном диапазоне для дальнейшего использования полученных результатов при оценке состояния электромагнитной обстановки и обеспечении безопасного пребывания людей вблизи исследуемой установки.

Ключевые слова: интенсивность электромагнитного поля, экспериментальные измерения, установка для орошения, методика наложения электромагнитных волн, компьютерное моделирование, электромагнитная обстановка.

Цитирование: Титов Е. В. Экспериментальное исследование электромагнитной обстановки с учетом наложения электромагнитных волн / Е. В. Титов, Е. Б. Осьмушкина // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(6). С. 658–666. EDN: UEVNMS

Введение

В связи с тем, что непрерывно развиваются методы выращивания сельскохозяйственных культур, особенно в холодном климате, с применением современных теплиц, оснащенных высокотехнологичными установками для создания микроклимата, правильного питания и орошения растений, необходимо учитывать электромагнитные излучения (ЭМИ), возникающие в процессе эксплуатации всего комплекса оборудования, находящегося в производственном помещении [1, 2]. При этом диапазон генерируемого спектра электромагнитных излучений изменяется от единиц Герц до ГГц. Поэтому возникает необходимость оценки плотности потока энергии в зонах длительного пребывания персонала [3, 4].

Материалы и методы

В Алтайском государственном техническом университете им. И. И. Ползунова разработана технология определения результирующей частоты и амплитуды [5], основанная на особенностях наложения когерентных и некогерентных волн. Методика наложения когерентных волн в рас-

ширенном до 3 ТГц диапазоне включает выбор несущей частоты и определение результирующей амплитуды по формуле (1) [3, 6].

$$A_{\Sigma} = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\Delta\omega t)}, \quad (1)$$

где A_1 – амплитудное значение первой частотной составляющей электромагнитного поля; A_2 – амплитудное значение второй частотной составляющей электромагнитного поля; $\Delta\omega$ – разность между циклическими частотами первого и второго накладываемых электромагнитных колебаний, рад/с; t – время колебания, с.

Определение результирующей частоты при наложении некогерентных волн проводится с учетом отношений их значений с помощью выражения (2) [7].

$$f_{\Sigma} = \bar{f} + \frac{1}{2} \cdot \frac{A_2 - A_1}{A_1 + A_2} \cdot \Delta f, \quad (2)$$

где \bar{f} – среднее арифметическое значение частоты накладываемых электромагнитных колебаний, Гц; A_1 – амплитудное значение первой частотной составляющей электромагнитного поля; A_2 – амплитудное значение второй частотной составляющей электромагнитного поля; Δf – разность между частотами первого и второго накладываемых электромагнитных колебаний, Гц.

Плотность потока энергии (ППЭ) на фиксированном расстоянии от источника излучения для когерентных и некогерентных волн предлагается рассчитать через интенсивность электромагнитного поля, используя известные выражения вектора Умова-Пойнтинга, с помощью формулы (3):

$$\text{ППЭ} = \frac{\sqrt{\xi_0}}{0,5 \cdot n} \cdot I_m \cos 2\pi f \left(t - \frac{l}{v} \right), \quad (3)$$

где $\xi_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi$ – волновое сопротивление вакуума, Ом; $n = \sqrt{\tilde{a}}$ – коэффициент преломления среды; I_m – амплитудное значение интенсивности электромагнитного поля, Вт/м²; f – частота распространения поля, Гц; t – время, с; l – расстояние между источником поля и точкой измерения поля, м; v – скорость распространения волны, м/с.

При завершении формирования наложенных колебаний по каждой частотной составляющей вычисляются максимальные значения параметров электромагнитного поля.

Практическая реализация предлагаемой методики рассмотрена для производственного помещения тепличного предприятия Сибири с установкой для орошения сельскохозяйственных культур, размеры которой составляют 1×2×2 м (рис. 1) [5].

Для проведения измерений и оценки электромагнитной обстановки использовалась следующая структура оснащения: ноутбук HP EliteBook 8440r и подключенные к нему анализатор спектра АКС-1201, устройство контроля радиочастотных ЭМП (30 МГц – 30 ГГц) и приборы ВЕ-метр-АТ-004, ПЗ-41 и Testo 435-4 [8]. Измерения проводились на требуемом расстоянии 10 см [9] от каждой стенки установки. Термографирование не проводилось, поскольку корпус установки выполнен из металла [8].



Рис. 1. Внешний вид установки для орошения сельскохозяйственных культур

Fig. 1. Appearance of the plant for irrigation of agricultural crops

Результаты

Результаты контрольных измерений ППЭ вблизи исследуемой установки на соответствующих частотах с учетом требований к оценке электромагнитной обстановки [9] сведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты контроля плотности потока энергии

Table 1. Results of energy flow density control

Частота	Плотность потока энергии ППЭ, мкВт/см ²	
	Боковые стенки	Передняя и задняя стенки
400 МГц	57,774	97,471
410 МГц	113,569	171,992
450 МГц	50,008	124,812
490 МГц	16,464	39,730
520 МГц	20,888	55,313
550 МГц	20,189	50,224
570 МГц	75,419	125,011
590 МГц	22,817	49,792
720 МГц	25,156	55,549
740 МГц	62,264	107,837
760 МГц	73,235	133,732
800 МГц	47,276	100,721
28,09 ГГц	17,832	48,487
28,37 ГГц	35,266	69,719

Примечания:

- предельно допустимый уровень (25 мкВт/см²) приведен для 8-ч рабочего дня;
- красным цветом выделены значения, превышающие ПДУ

Обсуждение результатов

Оценка интенсивности ЭМП выполнена с использованием предложенной методики. Величина наложенных электромагнитных волн рассчитана с учетом близлежащих частот, характеристики которых получены на предыдущем этапе вычисления. Промежуточные и конечные результаты определения характеристик результирующей волны для каждой составляющей ЭМП сведены в табл. 2 и 3. Учитывая, что имеется один малогабаритный источник излучения, фазовый сдвиг считается одинаковым.

Таблица 2. Получение результирующей волны для передней и задней стенок установки для орошения

Table 2. Obtaining the resulting wave for the front and back walls of the irrigation system

Исходные данные		Результаты наложения частотных составляющих ППЭ							
		1 этап		2 этап		3 этап		4 этап	
Частота	ППЭ, мкВт/см ²	Частота	ППЭ, мкВт/см ²	Частота	ППЭ, мкВт/см ²	Частота	ППЭ, мкВт/см ²	Частота	ППЭ, мкВт/см ²
400 МГц	97,471	406 МГц	269,463	427 МГц	434,005	480 МГц	714,345	10,7 ГГц	1230,390
410 МГц	171,992								
450 МГц	124,812	460 МГц	164,542	560 МГц	280,340	516,045			
490 МГц	39,730								
520 МГц	55,313	534 МГц	105,537	759 МГц	397,839				
550 МГц	50,224								
570 МГц	125,011	576 МГц	174,803	15,3 ГГц	516,045				
590 МГц	49,792								
720 МГц	55,549	733 МГц	163,386	28,26 ГГц	118,206				
740 МГц	107,837								
760 МГц	133,732	777 МГц	234,453	28,37 ГГц	69,719				
800 МГц	100,721								
28,09 ГГц	48,487	28,26 ГГц	118,206	28,37 ГГц	69,719				
28,37 ГГц	69,719								
28,37 ГГц	69,719								

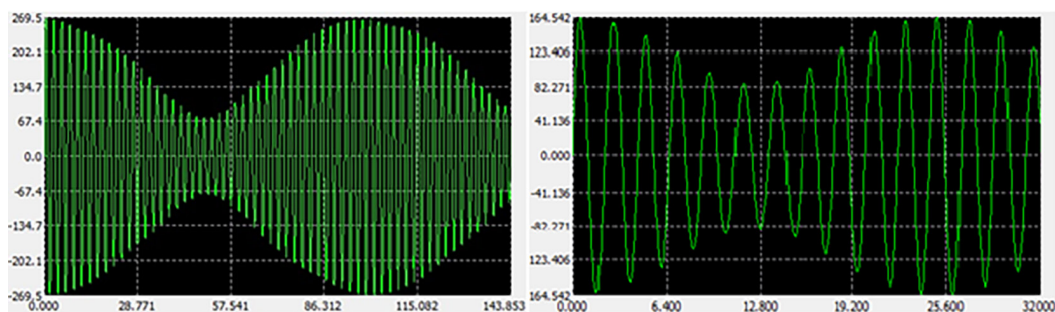


Рис. 2. Результат наложения частотных составляющих: а) 400 и 410 МГц; б) 450 и 490 МГц

Fig. 2. The result of the overlay of frequency components: a) 400 and 410 MHz; b) 450 and 490 MHz

Как видно из табл. 2, результирующая волна вблизи передней и задней стенок установки характеризуется мощностью сигнала $1230,390 \text{ мкВт/см}^2$ и частотой $10,7 \text{ ГГц}$. На рис. 2–8 приведены результаты наложения рассмотренных частотных составляющих ЭМП.

Аналогично получены параметры результирующей электромагнитной волны для боковых стенок установки. Результаты сведены в табл. 3.

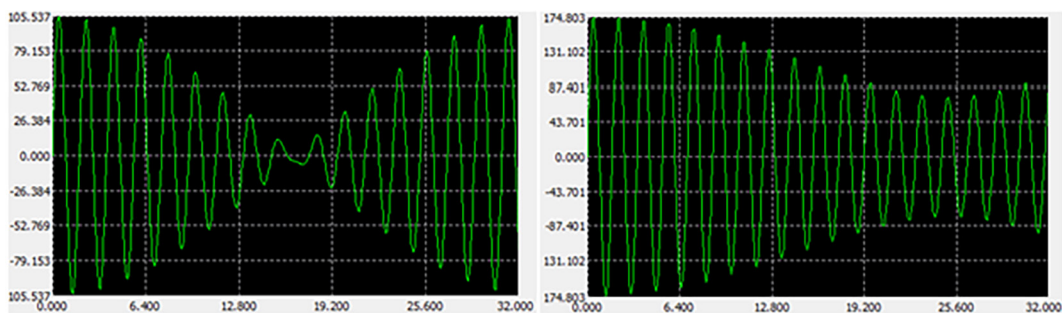


Рис. 3. Результат наложения частотных составляющих: а) 520 и 550 МГц; б) 570 и 590 МГц

Fig. 3. The result of the overlay of frequency components: a) 520 and 550 MHz; b) 570 and 590 MHz

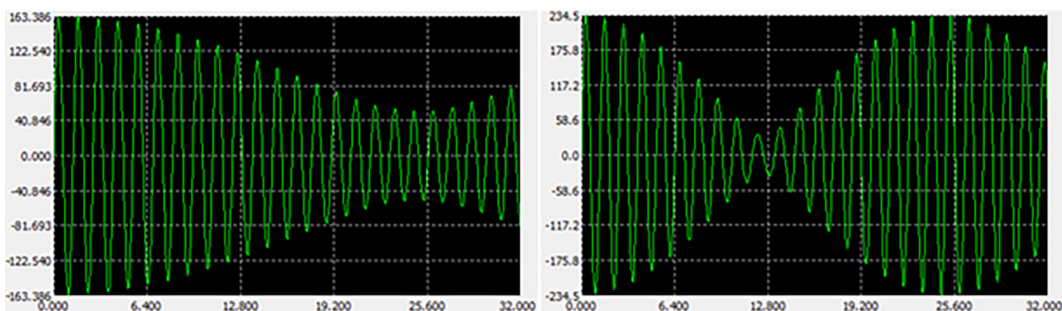


Рис. 4. Результат наложения частотных составляющих: а) 720 и 740 МГц; б) 760 и 800 МГц

Fig. 4. The result of the overlay of frequency components: a) 720 and 740 MHz; b) 760 and 800 MHz

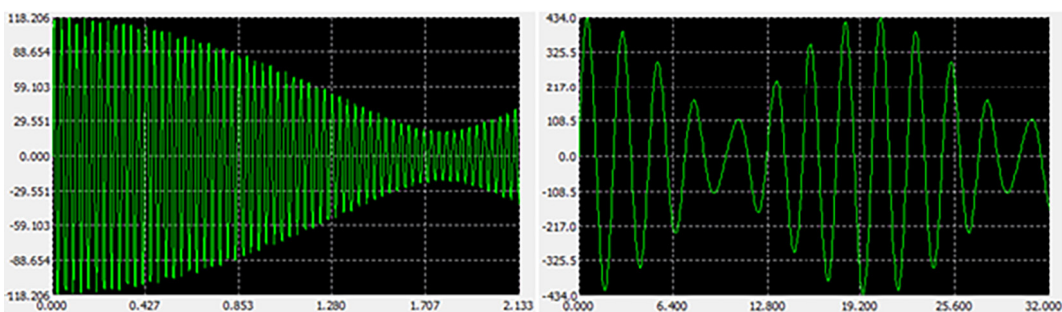


Рис. 5. Результат наложения частотных составляющих: а) 28,09 и 28,37 ГГц; б) 406 и 460 МГц

Fig. 5. The result of the overlay of frequency components: a) 28,09 and 28,37 GHz; b) 406 and 460 MHz

С учетом исследованных частотных составляющих ЭМП электромагнитная обстановка вблизи установки для орошения сельскохозяйственных культур характеризуется интенсивностью сигнала вблизи передней и задней стенки $1230,390 \text{ мкВт/см}^2$ и частотой $10,7 \text{ ГГц}$, а вблизи боковых стенок – $638,157 \text{ мкВт/см}^2$ и $14,2 \text{ ГГц}$ соответственно.

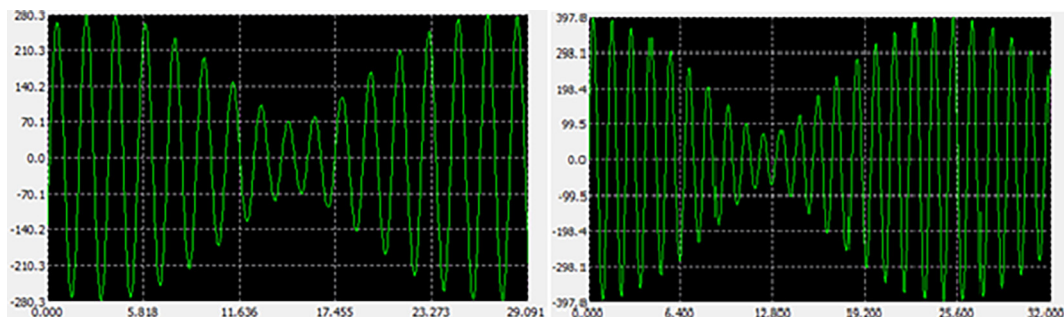


Рис. 6. Результат наложения частотных составляющих: а) 534 и 576 МГц; б) 733 и 777 МГц

Fig. 6. The result of the overlay of frequency components: a) 534 and 576 MHz; b) 733 and 777 MHz

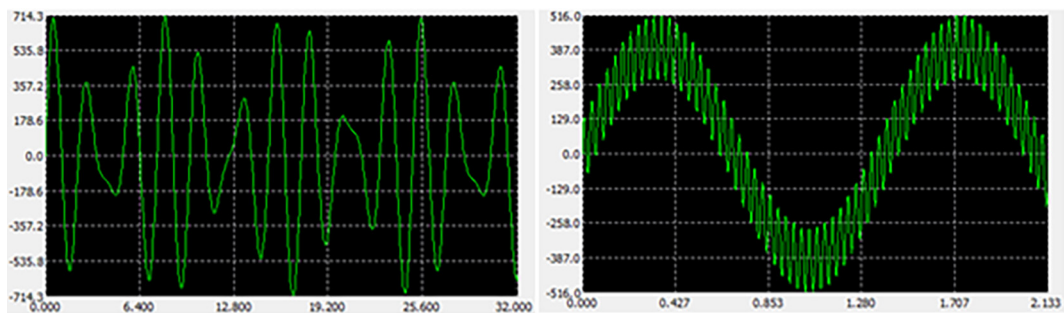


Рис. 7. Результат наложения частотных составляющих: а) 427 и 560 МГц; б) 759 МГц и 28,26 ГГц

Fig. 7. The result of the overlay of frequency components: a) 427 and 560 MHz; b) 759 MHz and 28,26 GHz

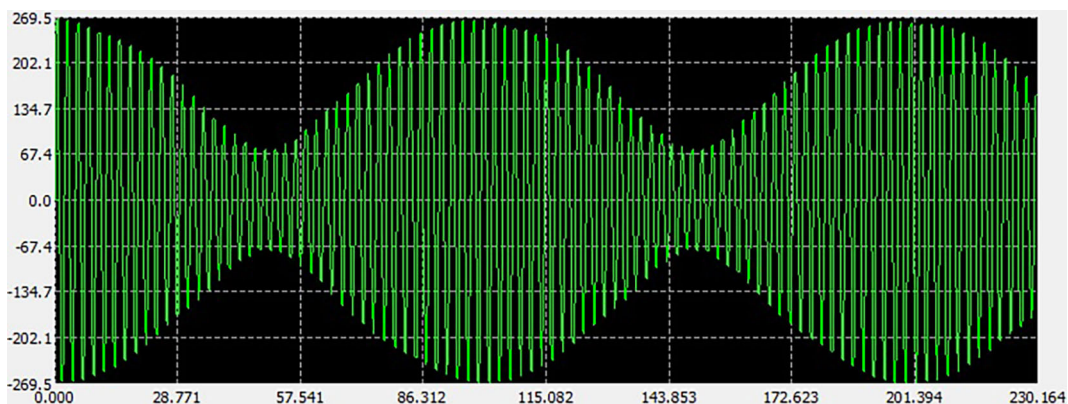


Рис. 8. Результат наложения частотных составляющих 480 МГц и 15,3 ГГц

Fig. 8. The result of the overlay of frequency components 480 MHz and 15,3 GHz

Таблица 3. Получение результирующей волны для боковых стенок установки

Table 3. Obtaining the resulting wave for the side walls of the installation

Исходные данные		Результаты наложения частотных составляющих ППЭ							
		1 этап		2 этап		3 этап		4 этап	
Частота	ППЭ, мкВт/ см ²	Частота	ППЭ, мкВт/ см ²	Частота	ППЭ, мкВт/ см ²	Частота	ППЭ, мкВт/ см ²	Частота	ППЭ, мкВт/ см ²
400 МГц	57,774	406 МГц	171,343	421 МГц	237,815	473 МГц	377,128	14,2 ГГц	638,157
410 МГц	113,569								
450 МГц	50,008	460 МГц	66,472	563 МГц	139,313	11,6 ГГц	261,029	14,2 ГГц	638,157
490 МГц	16,464								
520 МГц	20,888	535 МГц	41,077	758 МГц	207,931	11,6 ГГц	261,029	14,2 ГГц	638,157
550 МГц	20,189								
570 МГц	75,419	575 МГц	98,236	28,28 ГГц	53,098	11,6 ГГц	261,029	14,2 ГГц	638,157
590 МГц	22,817								
720 МГц	25,156	734 МГц	87,420	28,28 ГГц	53,098	11,6 ГГц	261,029	14,2 ГГц	638,157
740 МГц	62,264								
760 МГц	73,235	776 МГц	120,511	28,28 ГГц	53,098	11,6 ГГц	261,029	14,2 ГГц	638,157
800 МГц	47,276								
28,09 ГГц	17,832	28,28 ГГц	53,098	28,28 ГГц	53,098	11,6 ГГц	261,029	14,2 ГГц	638,157
28,37 ГГц	35,266								

Заключение

Таким образом, использование инструментальных средств измерений и разработанного программного обеспечения позволяет получать характеристики результирующих электромагнитных колебаний и визуально представлять процесс наложения составляющих электромагнитного поля на каждом этапе расчета, что является затруднительным при проведении точечных измерений. Полученные результаты можно использовать в дальнейшем при оценке электромагнитной обстановки в производственных и коммунально-бытовых помещениях с размещенным в них ЭМП-излучающим оборудованием.

Список литературы / References

[1] Призыв учёных по защите от воздействия неионизирующего электромагнитного поля. Международное обращение к Генеральному Секретарю Организации Объединённых Наций Антониу Гутерришу, государствам – членам ООН [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.emfscientist.org/index.php/emf-scientist-appeal> [Scientists call for Protection from Non-ionizing Electromagnetic Field Exposure. International appeal to the Secretary-General of the United Nations Antonio Guterres, U. N. Member Nations [Electronic resource] – Access: <https://www.emfscientist.org/index.php/emf-scientist-appeal>

[2] Маслов М. Ю., Сподобаев Ю. М., Сподобаев М. Ю. Обоснование предметной области электромагнитной безопасности, *Электросвязь*, 2018, 11, 63–67 [Maslov M. Yu., Spodobaev Yu. M., Spodobaev M. Yu. Substantiation of the subject area of electromagnetic safety, *Telecommunication*, 2018, 11, 63–67 (in Rus.)]

[3] Мишенков С. Л., Епифанова Е. С. Использование временных задержек при первичной обработке звуковых сигналов, *Электросвязь*, 2022, 1, 56–58 [Mishenkov S. L., Epifanova E. S. The use of time delays in the primary processing of audio signals, *Telecommunications*, 2022, 1, 56–58 (in Rus.)]

[4] Rubtsova N. B., Perov S., Belaya O. The development of mobile communication system and human health risks, *Safety and Health at Work*, 2022, 13, 10–11.

[5] Титов Е. В. *Методология комплексного контроля и визуализации электромагнитной обстановки в АПК*, автореф. дис. ... докт. техн. наук. Барнаул, 2021, 43 с. [Titov E. V. *Methodology of integrated control and visualization of the electromagnetic environment in the agro-industrial complex*, *Thesis ... doct. of tech. Sci.* Barnaul, 2021, 43 p. (In Rus.)]

[6] Крюков А. В., Черепанов А. В., Крюков А. Е. Определение электромагнитных влияний высоковольтных ЛЭП и тяговых сетей на трубопроводы, *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт*, 2020, 9, 62–72 [Kryukov A. V., Cherepanov A. V., Kryukov A. E. Determination of electromagnetic influences of high-voltage power lines and traction networks on pipelines, *Electrical equipment: operation and repair*, 2020, 9, 62–72 (in Rus.)]

[7] Aminch R. K., Ravan M., Sharma R. Nondestructive Testing of Nonmetallic Pipes Using Wideband Microwave Measurements, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, 68(5), 1763–1772.

[8] Titov E. V., Soshnikov A. A., Migalev I. E. Computer Imaging of Electromagnetic Environment in Air Space with Industrial Electromagnetic Field Sources in Conditions of Combined Influence of EM Radiation, *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, 2022, 22(1), 34–40.

[9] Никитина В. Н., Калинина Н. И., Ляшко Г. Г. Новые санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах, *Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета*, 2019, 5(5), 62–65 [Nikitina V. N., Kalinina N. I., Lyashko G. G. New sanitary and epidemiological requirements for physical factors in the workplace, *Proceedings of St. Petersburg State Maritime Technical University*, 2019, 5(5), 62–65 (in Rus.)]