

Сверхширокоугольный микрообъектив для капсульного медицинского эндоскопа

Г.И. Грейсукх¹, И. А. Левин², С.В. Казин¹

¹ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 440028, Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28;

² ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», Красногорск, 143400, Россия, Красногорск, ул. Речная, д. 8

Аннотация

Обобщены требования к оптическому тракту капсульной медицинской эндоскопической системы с фронтальным расположением объекта исследования. Показано, что компоновка оптической схемы микрообъектива на основе современных технологичных пластиков позволяет не только удовлетворить обобщённые требования, но и открывает возможность получения у простых по конструкции объективов существенно более высокого качества изображения, чем у известных аналогов. Это подтверждено представленными результатами расчета микрообъектива с относительным отверстием 1:2,4 и угловым полем зрения 170°, формирующего изображение диаметром 2,7 мм с разрешением не менее 188 мм⁻¹ при контрасте 0,5.

Ключевые слова: капсульный эндоскоп, сверхширокоугольный микрообъектив, компоновка оптической схемы, оптические характеристики.

Цитирование: Грейсукх, Г.И. Сверхширокоугольный микрообъектив для капсульного медицинского эндоскопа / Г.И. Грейсукх, И.А. Левин, С.В. Казин // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46, № 5. – С. 219-223. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-935.

Citation: Greisukh GI, Levin IA, Kazin SV. Designing an ultra-wide-angle microlens for a capsule medical endoscope. Computer Optics 2022; 46(2): 219-223. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-935.

Введение

Медицинская эндоскопия – это метод визуального исследования полых органов и полостей организма с помощью оптических приборов, снабженных осветительным устройством (эндоскопов). Одной из основных целей развития медицинских эндоскопов, начиная с конца 19 века и до настоящего времени, является минимизация травмирующего воздействия эндоскопа на исследуемые органы. Этапы этого развития включали переход от жестких и гнущихся линзовых эндоскопов к гибким на основе волоконной оптики и далее – вообще отказ от оптического тракта трансляции изображения, формируемого объективом, вводимым в организм пациента. В результате традиционный эндоскоп превратился в погружаемую в исследуемую полость пациента цифровую видеокамеру, соединяемую USB-кабелем с компьютером или смартфоном.

Следующим шагом, практически полностью исключая травмирующее воздействие оптического прибора на исследуемые органы, явилось создание капсульного эндоскопа, т.е. маленькой цифровой видеокамеры, размещенной в проглатываемой пациентом капсуле, передающей оцифрованное изображение по радиоканалу [1]. В капсуле размещаются миниатюрные объектив, матричный фотоприемник, видеопроцессор, приёмопередатчик с антенной, осветительная система и аккумулятор [2].

Основной недостаток капсульного эндоскопа связан со значительной сложностью контроля его поло-

жения и ориентации внутри исследуемого органа. Для того чтобы купировать этот недостаток и получать как можно более полное изображение исследуемого органа, необходимо снабдить капсульный эндоскоп сверхширокоугольным объективом высокого разрешения. На этот объектив накладываются жесткие габаритные ограничения, и предъявляются специфические требования к пространству объектов и формируемому изображению. Кроме того, в большинстве случаев видеокапсула является одноразовой, что сказывается на её допустимой стоимости. Последнее обстоятельство, в частности, препятствует усложнению оптической схемы объектива и вынуждает разработчиков искать пути удешевления производства, в том числе использовать полимерные материалы как для корпусных деталей, так и для линз оптического тракта [3].

Оптические пластмассы и существующие методы формообразования на основе прецизионной штамповки [4–5] позволяют массово тиражировать линзы, в том числе с асферическими поверхностями оптической точности. При этом номенклатура прозрачных в видимом диапазоне спектра пластиков с каждым годом увеличивается. Как будет показано в данной статье на примере объектива капсульного эндоскопа, применение современных оптических полимеров [6] даёт возможность без усложнения оптической схемы добиваться существенно более высокого качества изображения по сравнению с объективами-аналогами.

Целью данной статьи является обобщение требований к оптической схеме и анализ потенциальных

возможностей сверхширокоугольного объектива капсульного эндоскопа, сконструированного на основе современных оптических пластмасс.

1. Требования к габариту и оптическим характеристикам объектива

Ниже будут сформулированы требования к объективу капсульного эндоскопа, предназначенного для обследования наиболее труднодоступного отдела желудочно-кишечного тракта – тонкого кишечника. Его диаметр варьируется по длине и лежит, по разным данным, в диапазоне 20–30 мм [7] или 30–40 мм [2]. В некоторых статьях диаметр принимают равным 30 мм [3], а в ряде патентов – от 30 мм [8] до 75 мм [9]. Авторами настоящей статьи этот диаметр принят равным 30 мм.

По типу расположения объекта исследования относительно капсулы различают два вида эндоскопов: с фронтальным [10] и радиальным [11] расположением. При этом все капсульные эндоскопы с фронтальным расположением объекта исследования, как правило, предназначены для одноразового использования. Представляемый ниже объектив рассчитывался именно для такого эндоскопа. В качестве объекта рассматривалась часть сферы диаметром 60 мм из расчёта, что капсула может находиться не по центру тонкой кишки, а прилегать к её стенке одной из своих сторон как в состоянии покоя, так и при движении, обусловленном перистальтикой.

Габаритные размеры современных капсул для эндоскопии тонкой кишки составляют от 24 × 10,8 мм до 27,9 × 13 мм, где первый размер – длина, а второй – диаметр капсулы [2]. Учитывая необходимость размещения в капсуле приёмника излучения, осветительной системы, источника питания, приёмопередатчика и антенны, а также то, что фронтальная сферическая часть капсулы должна являться иллюминатором, габаритные размеры рассчитываемого объектива принимались равными 10 × 5 мм.

Рабочий спектральный диапазон объектива определяется осветительной системой, для которой используются, как правило, люминофорные или RGB-светодиоды [12]. Это позволило при расчете ограничиться длинами волн от 0,486 мкм до 0,656 мкм. Угловое поле зрения было принято равным $2\omega = 170^\circ$, что сопоставимо с угловым полем существующих капсульных систем [13].

Известно, что все сверхширокоугольные объективы имеют отрицательную (бочкообразную) дисторсию, которая «сжимает» изображение в периферийной области. При эндоскопическом исследовании это может привести к недооценке размера поражения или даже его пропуску. Поэтому величина дисторсии должна ограничиваться. Если при расчете объектива расстояние от объекта до входного зрачка поддерживается равным радиусу объектной сферы, то для дисторсии справедлива формула

$$\delta Y = \frac{Y(\omega + \delta\omega) - Y(\omega)}{Y(\delta\omega)}, \quad (1)$$

где $Y(\omega)$ – высота изображения при угле поля зрения ω ; $\delta\omega$ – малое отклонение угла поля зрения. Как показано в работе [9], величина дисторсии, вычисляемая по формуле (1), у капсульных систем должна лежать в пределах от 0,7 до 1,3.

Исходя из допустимого диаметра капсулы эндоскопа предполагалось, что изображение будет формироваться объективом на матричном фотоприемнике формата 1/4", например, на одной из наиболее высоко разрешающих из коммерчески доступных CMOS-матриц OV8856 с размером пикселя $\Lambda = 1,12$ мкм [14]. Диаметр формируемого объективом кругового поля изображения не должен превышать размера наименьшей стороны матричного фотоприёмника. При этом, как показано в [15], необходимым условием достижения высокого качества изображения является ограничение спектра пространственных частот в подаваемом на матричный фотоприемник изображении величиной

$$N_B = 0,25 \dots 0,5 / 2\Lambda, \quad (2)$$

т.е. в нашем случае $N_B \leq 225 \text{ мм}^{-1}$. Кроме того, контраст на частоте $0,5N_B$ должен превышать контраст на частоте N_B как минимум в полтора-два раза. Данное условие в совокупности с соотношением (2), с одной стороны, и необходимостью минимизации энергетических затрат на освещение, с другой – учитывалось при выборе оптимального значения относительного отверстия объектива.

Продольное расстояние от сферического иллюминатора капсулы до первой линзы объектива было принято равным 2,5 мм, исходя из необходимости размещения под иллюминатором как объектива, так и осветительных светодиодов [2].

2. Сверхширокоугольный микрообъектив

Опираясь на вышеизложенные требования, в качестве основных оптических характеристик объектива капсульного эндоскопа были приняты следующие: заднее фокусное расстояние $f' = 0,98$ мм; относительное отверстие 1:2,4; угловое поле зрения $2\omega = 170^\circ$; линейное поле изображения $2y' = 2,7$ мм, соответствующее меньшей стороне фотоприёмника формата 1/4".

Переходя к описанию синтеза оптической схемы объектива, следует отметить, что в любом сверхширокоугольном объективе для развития полевого угла в качестве фронтальной линзы применяется силовой отрицательный мениск. При этом для формирования действительного изображения предмета требуется наличие в схеме силового положительного компонента. Если остановиться на такой двухкомпонентной схеме, то для достижения коррекционного баланса в объективе в целом следует предусмотреть в первом компоненте, кроме оптически сильного отрицатель-

ного мениска, оптически слабую положительную линзу для подавления астигматизма, вносимого мениском, а во втором компоненте – склеенного дублета для комплексного подавления аберраций наклонных пучков. Поверхность склейки при этом обеспечит устранение хроматических искажений. Аберрации широких пучков лучей могут быть устранены путём асферизации поверхностей линз, описывая их, как, например, в работе [16], используемым в программном пакете оптического проектирования ZEMAX [17] уравнением чётной асферической поверхности:

$$z(\rho) = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2\rho^2}} + \sum_{i=2} \alpha_i \rho^{2i}, \quad (3)$$

где $z(\rho)$ – координата точки поверхности, отстоящей от оптической оси на расстояние ρ в системе координат, связанной с вершиной этой поверхности; $c = 1/r$ – кривизна поверхности в ее вершине; k – коническая постоянная; α_i – коэффициенты асферической деформации.

В качестве оптических материалов склеенного дублета была выбрана крон-флинтовая пара современных технологичных пластиков APL5014CL и EP9000 [6]. Они, с одной стороны, обладают высоким для пластмасс показателем преломления ($n_d = 1,5445$ для APL5014CL и $n_d = 1,6714$ для EP9000), что улучшает возможности коррекции монохроматических аберраций. С другой стороны, разница в значениях чисел Аббе сопоставима с материалами из оптического стекла ($v_d = 55,99$ для APL5014CL и $v_d = 19,24$ для EP9000), что способствует устранению хроматизма.

В качестве материала сферического иллюминатора был выбран поликарбонат марки POLYCARB ($n_d = 1,5855$; $v_d = 29,91$) каталога MISC [17], как технологичный и дешёвый материал, устойчивый к соляной кислоте. Для фронтального мениска и двух следующих за ним линз был выбран, как и для первой линзы склеенного дублета, кроноподобный пластик APL5014CL.

В результате оптимизации в среде ZEMAX скомпонованной вышеописанным образом схемы были получены конструктивные параметры сверхширокоугольного микрообъектива капсульного эндоскопа (см. таблицу). На рис. 1 представлена оптическая схема рассчитанного объектива (нумерация его поверхностей соответствует таблице).

Величина дисторсионных искажений данного микрообъектива укладывается в диапазон 0,8–1,0 при предпочтительных значениях в пределах от 0,7 до 1,3. Габариты не превышают 10×10 мм и $4 \times 6,5$ мм, с учётом и без учёта прозрачного сферического иллюминатора диаметром 10 мм соответственно. Микрообъектив по всему полю зрения обеспечивает разрешение не менее 188 мм^{-1} при контрасте 0,5

и не менее 95 мм^{-1} при контрасте 0,75 (см. рис. 2), что согласуется с требуемым соотношением контрастов на частотах $0,5 N_B$ и N_B . В результате матричный фотоприемник формата 1/4" с размером пикселя в пределах $\Lambda = (0,66 - 1,33)$ мкм не будет искажать высококачественное изображение, формируемое рассчитанным микрообъективом.

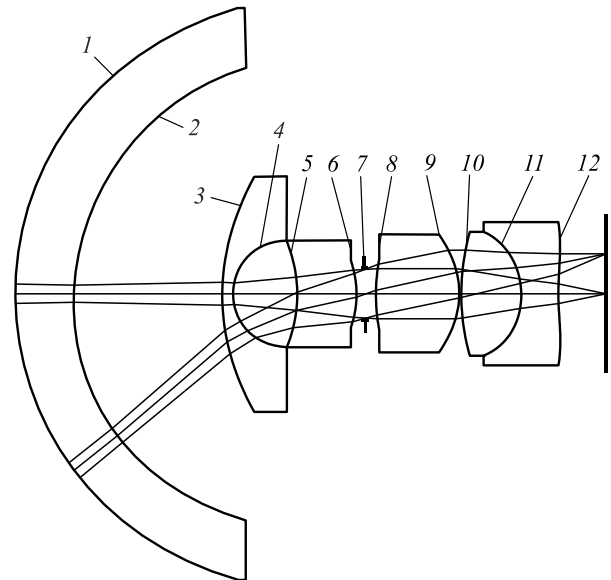


Рис. 1. Оптическая схема сверхширокоугольного объектива капсульного эндоскопа

Для сравнения в работе [18], посвящённой расчёту аналогичного объектива, его пространственное разрешение при сопоставимом угле поля зрения, линейном поле изображения и габаритах не превышает 140 мм^{-1} для контраста 0,5. При этом относительное отверстие 1:3,4 обеспечивает практически вдвое меньший поток энергии, что повышает затраты на освещение объекта исследования. Кроме того, объектив обладает сложной оптической схемой из 9 линз с поверхностями свободной формы.

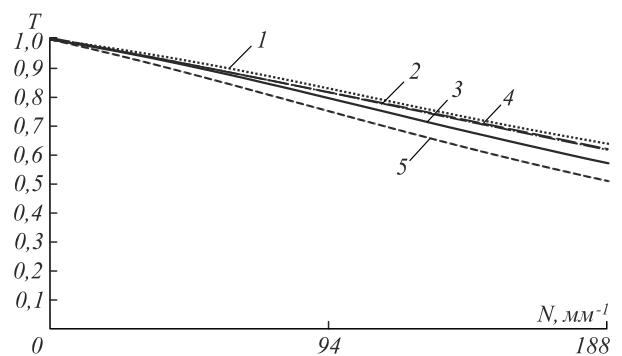


Рис. 2. Полихроматические частотно-контрастные характеристики сверхширокоугольного объектива капсульного эндоскопа (T – контраст; N – пространственная частота):
1 – при $\omega = 0$; 2 и 3 – при $\omega = 55^\circ$; 4 и 5 – при $\omega = 85^\circ$
для меридиональной и сагиттальной плоскостей соответственно

Табл. Конструктивные параметры сверхширокоугольного объектива капсульного эндоскопа

Номер пов-ти	Радиус, мм	Толщина, мм	Материал	Коэффициенты асферической деформации при $k=0$		
				$\alpha_2 \cdot 10^2, \text{мм}^{-3}$	$\alpha_3 \cdot 10^3, \text{мм}^{-5}$	$\alpha_4 \cdot 10^4, \text{мм}^{-7}$
Объект	30,0000	25,3779		0	0	0
1	5,0000	1,0000	POLYCARB	0	0	0
2	4,0000	2,5000		0	0	0
3	3,9196	0,1797	APL5014CL	0	0	0
4	0,9133	1,1010		3,0381	-31,4451	287,2410
5	-2,3370	0,9678	APL5014CL	2,3201	-2,2740	2,1648
6	-1,8182	0,1341		13,0626	-106,9652	827,4450
7*	∞	0,1928		-	-	-
8	4,1710	1,4355	APL5014CL	8,4081	-145,6141	200,9580
9	-1,5780	0,0015		-2,7319	41,5025	-394,4270
10	2,3671	1,0350	APL5014CL	-6,2645	27,3256	-239,5450
11	-1,1778	0,6214	EP9000	0	0	0
12	10,8006	0,7966		-4,3469	7,9987	-6,3940

* – апертурная диафрагма.

Заключение

Компоновка оптической схемы на основе современных технологичных пластиков, прозрачных в видимом диапазоне излучения, открывает возможность получать у простых по конструкции объективов существенно более высокое качество изображения по сравнению с известными аналогами. В частности, на примере микрообъектива капсульного эндоскопа показано, что использование для его линз кронепоподобного (APL5014CL) и флинтоподобного (EP9000) пластиков позволило у двухкомпонентной пятилинзовой схемы поднять разрешение на 25 %, а светосилу удвоить по сравнению с девятилинзовым аналогом. Действительно, расчет показал, что этот объектив с задним фокусным расстоянием $f'=0,98$ мм, относительным отверстием 1:2,4 и угловым полем зрения $2\omega=170^\circ$ формирует изображение диаметром 2,7 мм с разрешением не менее 188 мм^{-1} при контрасте 0,5.

Кроме того, обобщение требований к оптическому тракту капсульной эндоскопической системы, дающее представление о предъявляемых габаритных ограничениях, форме и расположении предметной плоскости, а также предельных значениях дисторсионных искажений, обеспечивает комплексную оценку основных параметров разрабатываемого объектива на этапе компоновки оптической схемы.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00081).

References

- [1] Li Z, Liao Z, McAlindon M, eds. Handbook of capsule endoscopy. Dordrecht: Springer; 2014. ISBN: 978-94-017-9228-8.
- [2] Basar MR, Malek F, Juni KM, Idris SM, Saleh IM. Ingestible wireless capsule technology: A review of development and future indication. Int J Antennas Propag 2012; 2012: 807165. DOI: 10.1155/2012/807165.

- [3] Tang L, Hu C, Xie K, Cheng C, Liu Z. Optimized design of Capsule endoscopy lens based on Zemax. IEEE Int Conf on Information and Automation 2011: 57-62. DOI: 10.1109/ICINFA.2011.5948963.
- [4] Schaub MP. The design of plastic optical systems. Bellingham: SPIE Press; 2009.
- [5] Baumer S, ed. Handbook of plastic optics. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA; 2005.
- [6] Mitsubishi gas chemical. Source: (<<http://www.mgc.co.jp/eng/products>>).
- [7] Helander HF, Fändriks L. Surface area of the digestive tract – revisited. Scand J Gastroenterol 2014; 49(6): 681-689. DOI: 10.3109/00365521.2014.898326.
- [8] Yamamoto R. Imaging lens and capsule endoscope. Patent Japan of Invent N5172490 of March 27, 2013.
- [9] Baba T. Imaging lens system and capsule endoscope. Patent USA of Invent N7796342 of September 14, 2014.
- [10] Han P, Tseng YC, Tsai CM. Wide field of view lens design with uniform image illumination in capsule endoscope system. Microsyst Technol 2021; 27(4): 1115-1122. DOI: 10.1007/s00542-018-4104-y.
- [11] Ou-Yang M, Jeng WD. Design and analysis of radial imaging capsule endoscope (RICE) system. Opt Express 2011; 19(5): 4369-4383. DOI: 10.1364/OE.19.004369.
- [12] Matsuzawa H, Yokoi T, Orihara T, Konno M. Capsule type endoscope. Patent USA of Invent N7153259 December 26, 2006.
- [13] Olympus Endoscope Overview. 2020. Source: (<<http://www.olympus-europa.com/medical/rmt/media/en/Content/Content-MSD/Documents/Brochures/ENDOSCOPE-OVERVIEW-2017-2018.pdf>>).
- [14] OmniVision OV8856. Source: (<<http://www.ovt.com/sensors/OV8856>>).
- [15] Greisukh GI, Ezhov EG, Kazin SV, Stepanov SA. Response of a matrix photodetector into components of an optical signal with different spatial frequencies. Quantum Electron 2017; 47(1): 71-74. DOI: 10.1070/QEL16256.
- [16] Greisukh GI, Levin IA, Kasin SV. Active athermalization of dual-infrared zoom lenses. Computer Optics 2020; 44(6): 931-936. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-775.
- [17] ZEMAX: Optical, illumination, and laser system design software. Source: (<<http://www.zemax.com/products/optic-studio>>).

- [18] Chen L, Yuan Q, Ye J, Xu N, Cao X, Gao Zh. Design of a compact dual-view endoscope based on a hybrid lens with annularly stitched aspheres. Opt Commun 2019; 453: 124346. DOI: 10.1016/j.optcom.2019.124346.

Сведения об авторах

Грейсух Григорий Исаевич, 1943 года рождения. В 1965 году окончил Пензенский политехнический институт по специальности «Радиотехника». Заслуженный работник высшей школы РФ, доктор технических наук (1990 год), профессор. Работает заведующим кафедрой физики и химии Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. Является членом Европейского оптического общества (EOS) и Российского оптического общества им. Д.С. Рождественского. Г.И. Грейсух – специалист в области расчёта оптических систем, дифракционной и градиентной оптики. В списке научных работ Г.И. Грейсуха более 210 статей, 3 монографии, 9 авторских свидетельств и 2 патента. E-mail: grey@pguas.ru.

Левин Илья Анатольевич, 1987 года рождения. В 2009 году окончил Пензенский государственный университет по специальности 01.07.01 «Физика». Кандидат физико-математических наук (2013 год), работает ведущим инженером-конструктором ПАО «Красногорский механический завод им. С.А. Зверева», Красногорск. И.А. Левин – специалист в области расчёта оптических систем. В списке научных работ И.А. Левина 24 публикации. E-mail: i.a.levin@mail.ru.

Казин Сергей Владимирович, 1988 года рождения. В 2010 году окончил Пензенский государственный университет архитектуры и строительства по специальности «Информационные системы и технологии». Кандидат физико-математических наук (2012 год), научный сотрудник кафедры физики и химии Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. В списке научных работ С.В. Казина 15 публикаций. E-mail: grey@pguas.ru.

ГРНТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 6 июня 2021 г. Окончательный вариант – 7 октября 2021 г.

Designing an ultra-wide-angle microlens for a capsule medical endoscope

G.I. Greisukh¹, I.A. Levin², S.V. Kazin¹

¹ Penza State University of Architecture and Construction,
440028, Russia, Penza, Germana Titova, 28,

² PJSC "Krasnogorsky Zavod" 143400, Russia, Krasnogorsk, Rechnaya, 8

Abstract

Requirements for the optical tract of a capsule medical endoscopic system with a frontal location of the object under research are summarized. It is shown that the optical layout of a microlens built from easy-to-fabricate modern plastics not only allows satisfying generalized requirements, but also opens up the possibility of obtaining a significantly higher-quality image in simple-design lenses compared with well-known analogs. This is confirmed by the presented results of calculating a microlens with a relative aperture of 1: 2.4 and an angular field of view of $2\omega = 170^\circ$, which forms an image with a diameter of 2.7 mm with a resolution of at least 188 mm⁻¹, and a contrast of 0.5.

Keywords: capsule endoscope, ultra-wide-angle microlens, composition of optical scheme, optical performance.

Citation: Greisukh GI, Levin IA, Kazin SV. Designing an ultra-wide-angle microlens for a capsule medical endoscope. *Computer Optics* 2022; 46(2): 219-223. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-935.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 20-19-00081).

Authors' information

Grigoriy Isaevitch Greisukh (b. 1943) graduated (1965) from Penza Polytechnical Institute, majoring in Radio Engineering. He is the deserved worker of the Russian Higher School. He received his Doctor in Technical (1990) degrees from the Leningrad Institute of Precision Mechanics and Optics. He is chief of the Physics and Chemistry department of the Penza State University of Architecture and Construction. G.I. Greisukh is EOS and D. S. Rozhdestvensky Optical Society member. His current research interests include design of optical system, diffractive and gradient-index optics. He is co-author of 210 scientific papers, 3 monographs, 9 inventions, and 2 patents. E-mail: grey@pguas.ru.

Il'ya Anatolievich Levin (b. 1987) graduated (2009) from Penza State University, majoring in Physics. He is Ph.D. and he works as a leading design engineer at PJSC "Krasnogorsky Zavod". His current research interests include design of optical systems. He is co-author of 24 scientific publications. E-mail: i.a.levin@mail.ru.

Sergey Vladimirovich Kazin (b. 1988) graduated (2010) from the Penza State University of Architecture and Construction, majoring in Information Systems and Technologies. He received his Candidate in Physics & Maths (2012) degrees from Samara State Aerospace University. He is researcher of the Physics and Chemistry department of the Penza State University of Architecture and Construction. He is co-author of 15 publications. E-mail: grey@pguas.ru.

Received June 6, 2021. The final version – October 7, 2021.
