

Оптический журнал

Расчет, проектирование и производство оптических систем

УДК 681.784.83, 681.772.7, 535.317.2

Бинокулярные лупы на основе телескопической системы Галилея

© 2021 г. С. Н. Бездидько*, доктор техн. наук; С. В. Мишин**, канд. техн. наук;
Г. А. Можаров*, доктор техн. наук

*Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва

**Красногорский завод им. С.А. Зверева, г. Красногорск Московской обл.

E-mail: sbezdidko@mail.ru, SvyatoslavMishin@yandex.ru, po@miigaik.ru

Поступила в редакцию 02.07.2021

DOI:10.17586/1023-5086-2021-88-11-36-45

Представлено исследование актуальности разработки медицинских бинокулярных луп на основе телескопических систем Галилея и Кеплера в наши дни. В статье рассмотрены краткая история развития и современные аспекты применения бинокулярных луп в медицине. Определены основные требования, предъявляемые к бинокулярным лупам медицинскими работниками. Сформулированы основные этапы разработки оптических схем бинокулярных луп. Приведены оптические схемы и характеристики конкретных вариантов бинокулярных луп на основе телескопической системы Галилея, предлагаемых для практической реализации.

Ключевые слова: бинокулярная лупа, система Галилея, хирургическая бинокулярная лупа, стоматологическая лупа.

Коды OCIS: 170.3890, 330.7338, 170.1850, 220.3620

Использование в медицинской и, в частности, хирургической практике оптических систем, позволяющих с увеличением наблюдать расположенные на конечном расстоянии предметы, берет свое начало в XIX столетии. Первоначально это были одиночные положительные линзы, смонтированные в оправу очков и используемые в качестве лупы. Примером могут быть бинокулярные лупы Бишопа–Гармана, использовавшиеся в офтальмологии (рис. 1) [1].

Необходимость повышения кратности увеличения и рабочего расстояния — расстояния

от глаз наблюдателя до предмета, требовала увеличения числа оптических компонентов. Таким образом, следующим шагом в развитии бинокулярных луп стало использование оптических схем из двух компонентов, разделенных воздушным промежутком. Введение второго компонента также открывало возможность коррекции хроматических aberrаций. Первой из таких схем стала телескопическая система Галилея, адаптированная для работы с конечного расстояния (рис. 2).

Один из первых вариантов бинокулярной лупы на основе системы Галилея был разработан фирмой Carl Zeiss в 1912 г. (рис. 3). Угловое увеличение в данной лупе составляло 2^{\times} , а рабочее расстояние составляло 200 мм. Данная лупа была испытана на практике известным офтальмологом Альваром Гульстрандом, после чего применение этого типа луп стало активно внедряться в хирургической офталь-



Рис. 1. Бинокулярная лупа Бишопа–Гармана.

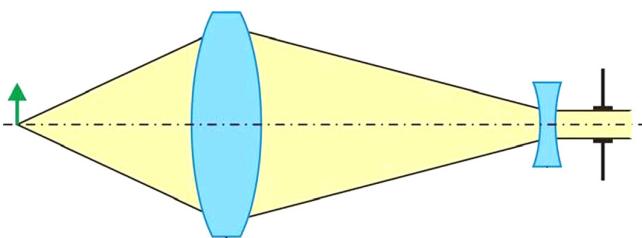


Рис. 2. Лупа на основе телескопической системы Галилея.

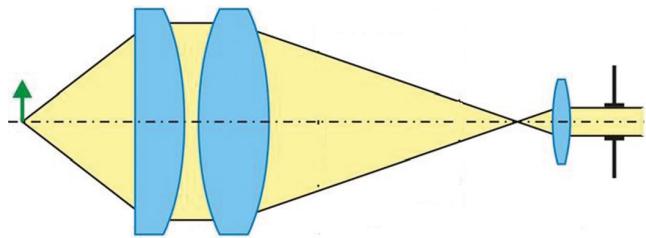


Рис. 4. Лупа на основе телескопической системы Кеплера.

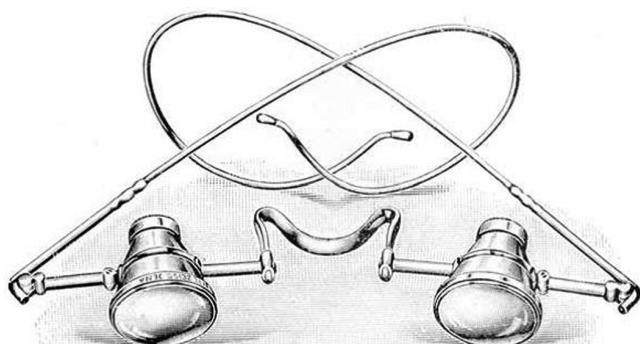


Рис. 3. Бинокулярная лупа, разработанная фирмой *Carl Zeiss*.

мологии [1]. К достоинствам этой схемы относятся простота конструкции, малый вес и осевая длина. К недостаткам можно отнести наличие большой сферической аберрации и кривизны поля изображения при увеличениях более $2,5^{\times}$, что приводит к снижению качества изображения и в результате не позволяет эффективно использовать данную схему при больших значениях увеличения [2].

Альтернативной оптической принципиальной схемой для создания бинокулярных луп является телескопическая система Кеплера, которая, также как и система Галилея, адаптирована для работы с конечного расстояния (рис. 4). Поскольку изначально система Кеплера дает действительное перевернутое изображение наблюдаемого предмета, лупы на основе этой системы имеют встроенную, как правило, призменную, оборачивающую систему. За счет оборачивающей системы также добиваются уменьшения осевой длины.

По сравнению с лупами на основе системы Галилея, использование системы Кеплера обладает следующими преимуществами:

- возможность получения больших значений углового увеличения (до 6^{\times}) при том же качестве изображения,

- более широкое поле в пространстве предметов,

- возможность получения больших значений рабочего расстояния.

Основными недостатками являются увеличенная масса (увеличение до 40%) и стоимость. Кроме того, такие лупы более требовательны к качеству просветляющих покрытий за счет значительно большего числа оптических поверхностей, что увеличивает стоимость и трудоемкость изготовления [2].

Сегодня бинокулярные лупы на основе телескопических систем Галилея и Кеплера активно применяются в различных областях медицины. К ним относится не только офтальмология, но и ортопедическая и сосудистая хирургия, челюстно-лицевая и пластическая хирургии, стоматология, а также оториноларингология и урология [2, 3]. Представители медицинского сообщества, которые являются основными пользователями таких оптических приборов, чаще всего называют следующие преимущества использования бинокулярных луп в наши дни [4–7]:

- повышение остроты зрения и, как следствие, повышение качества диагностики и точности выполнения врачебных манипуляций за счет увеличения оптической системы,

- использование комфортного рабочего расстояния (от 350 до 500 мм), что позволяет врачу сохранять удобную позу при проведении хирургических манипуляций и тем самым снижать риск возникновения профессиональных заболеваний различных отделов позвоночника.

Несмотря на простоту оптических принципиальных схем, вопросы применения и совершенствования бинокулярных луп остаются актуальными. С одной стороны об этом свидетельствует рост количества научных публикаций (рис. 5) в медицинском сообществе по

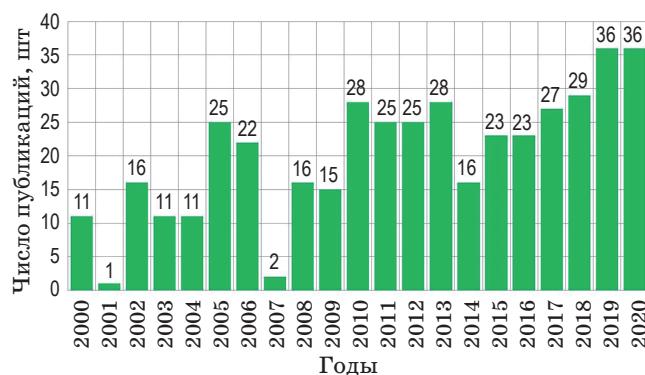


Рис. 5. Количество научных публикаций по данным базы данных PubMed по запросу «*Surgical loupe*».

данным статистики известной базы данных PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov>) по запросу «*Surgical loupe*».

С другой стороны об этом говорят и данные исследования рынка бинокулярных луп, опубликованные одним из ведущих аналитических агентств *Grand View Research* (<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/ophthalmic-loupes-market>). В исследовании рассматривались двухкомпонентные лупы на основе телескопических систем Галилея и Кеплера, а также однокомпонентные налобные лупы. Так, согласно данным этого агентства в 2019 г. мировой объем рынка бинокулярных луп только в сфере офтальмологии оценивался в 399,6 млн. долларов США. В 2020 г. этот показатель достиг значения 423,1 млн. долларов США. Рост рынка бинокулярных луп на период 2020–2027 гг. в данном исследовании прогнозируется на уровне 6,7% в год. Наибольший сегмент рынка в 38,3% по состоянию на 2019 г. занимали бинокулярные лупы на основе телескопической системы Галилея. Основными производителями медицинских бинокулярных луп на сегодняшний день являются такие фирмы как *Orascoptic* (США), *SurgiTel* (США), *Carl Zeiss* (Германия), *Keeler* (Великобритания), *ExamVision* (Дания). Кроме того, бинокулярные лупы производятся множеством различных компаний в Китае. Конструктивно данные лупы изготавливаются в двух вариантах – навесные (или «на очки») и встроенные в очки (рис. 6).

Несмотря на востребованность таких оптических систем в мире, в России практически



Рис. 6. Конструктивные исполнения современных бинокулярных навесной лупы (а) и лупы, встроенной в очки (б).

отсутствует собственное производство медицинских бинокулярных луп систем Галилея и Кеплера. В продаже встречаются простейшие однокомпонентные лупы ЛБМ-02 (ОАО «ТочМедПрибор», Харьков, Украина), а также бинокулярные лупы с осветителем ЛБ-1 (АО ЛЗОС, г. Лыткарино Московской обл.), выполненные на основе двухкомпонентной оптической системы. Линейка бинокулярных луп на основе систем Галилея и Кеплера существовала в свое время и на ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева». В частности, выпускались модели ЛБ-П, ЛБ-Ш, ЛБ-1М и ЛБ-2М на очковых оправах, а также модели МБП-1 и ЛБ-3М на головном обруче. Однако в настоящее время эти лупы окончательно сняты с производства и отсутствуют в продаже.

Все изложенное выше позволяет судить об актуальности и экономической целесообразности разработки и изготовления в нашей стране медицинских бинокулярных луп на основе телескопических систем.

Таким образом, авторами была сформулирована основная практическая задача настоящей работы — расчет вариантов оптических схем

бинокулярных луп медицинского назначения для последующей практической реализации.

Решение поставленной задачи включает в себя следующие этапы: выбор варианта композиции оптической принципиальной схемы, определение основных технических характеристик и их значений, а также расчет вариантов оптических схем и их aberrационный анализ.

В качестве варианта композиции оптической принципиальной схемы была выбрана схема телескопической системы Галилея. Выбор обусловлен тем, что, как было отмечено выше, лупы на основе этой системы обладают наиболее простой конструкцией и не требуют наличия обрачивающей системы.

С целью определения основных технических характеристик и их значений, которым

Таблица 1. Технические характеристики бинокулярных луп на основе телескопической системы Галилея зарубежных производителей

Производитель	Orascoptic		SurgiTel		Keeler		Carl Zeiss	ExamVision
Модель/серия	RDH EliteEdge	HDL 2.5 Macro	Micro 250	Micro 300	SuperVu	Mini-Loupe	EyeMag Smart	Galilean HD
Угловое увеличение, крат	2,5	2,5	2,5	3,0	2,0/ 2,5/3,0*	2,5	2,5	2,3/2,8/ 3,3/3,8
Рабочее расстояние, мм	*	*	250– 760*	250– 760*	340/420/ 460/500*	340/420/ 460/500*	300/350/ 400/450/550*	300–600*
Линейное поле зрения в пространстве предметов, мм	102	104	80– 210**	70– 140**	75/95/ 105/114**	75/95/ 105/114**	67/77/86/ 96/115**	71,1–108**

Примечание. * — фактическое значение величины определяется пользователем при заказе изделия либо указанием им требуемого значения, либо путем выбора требуемого значения из предлагаемого диапазона или ряда дискретных значений. ** — фактическое значение величины определяется производителем в зависимости от выбранных пользователем при заказе изделия значений углового увеличения и рабочего расстояния.

Таблица 2. Технические характеристики бинокулярных луп на основе телескопической системы Галилея отечественных производителей

Производитель	ЛЗОС	Красногорский завод им. С.А. Зверева (все модели сняты с производства)			
Модель/серия	ЛБ-1	ЛБ-1М	ЛБ-2М	МБП-1	ЛБ-Ш
Увеличение, крат	2,5/3,3/4,5*	2,8–3,3***	2,0	2,8–3,3***	2,0
Рабочее расстояние, мм	300	350–900***	430	350–900***	430
Линейное поле зрения в пространстве предметов, мм	35/25/15**	38–124***	70	38–140***	95

Примечание. * — фактическое значение величины определяется пользователем при заказе изделия либо указанием им требуемого значения, либо выбором им требуемого значения из предлагаемого диапазона или ряда дискретных значений. ** — фактическое значение величины определяется производителем в зависимости от выбранных пользователем при заказе изделия значений углового увеличения или рабочего расстояния. *** — фактическое значение величины изменяется в зависимости от установленного значения диоптрийной коррекции на каждом из монокуляров, составляющих изделие, более точные сведения о значениях данной характеристики отсутствуют.

Таблица 3. Технические требования к разрабатываемым оптическим схемам

Параметр	Значение
Угловое увеличение, крат	от 2,0 до 3,0
Рабочее расстояние, мм	от 350 до 500
Линейное поле зрения в пространстве предметов, мм	от 70 до 100

должны соответствовать разрабатываемые образцы оптических схем, был проведен анализ продукции зарубежных и отечественных производителей медицинских бинокулярных луп. В табл. 1 представлены основные технические характеристики бинокулярных луп на основе телескопической системы Галилея зарубежных производителей, в табл. 2 — отечественных производителей.

Представленные выше технические характеристики бинокулярных луп на основе телескопической системы Галилея позволили сформулировать требования к разрабатываемым оптическим схемам, которые приведены в табл. 3.

Стоит отметить, что ни одним из перечисленных выше производителей не приводится информация о диаметре выходного зрачка D' и его удалении s_p' относительно последней оптической поверхности. Данные параметры также следует считать одними из основных при расчете бинокулярных луп, поскольку от них зависят освещенность наблюдаемого изображения, а также характеристики виньетирования в оптической системе. Поскольку разрабатываемые оптические схемы предназначены для работы с глазом, то диаметр выходного зрачка оптической системы и диаметр зрачка глаза наблюдателя должны быть согласованы как по размеру, так и по положению в пространстве [8–10]. Поэтому для последующих расчетов были приняты следующие значения диаметра и удаления выходного зрачка — $D' = 5$ мм, $s_p' = 10$ мм. Значение s_p' было выбрано также исходя из предположения, что рассчитанные варианты оптических схем будут использованы для создания бинокулярных луп, встроенных в очки (рис. 6б).

Для расчета вариантов оптических схем бинокулярных луп был использован метод проб, где в качестве начальных вариантов были взяты аналогичные оптические системы, пред-

ставленные в патентах [11–16]. Оптимизация конструктивных параметров и последующий aberrационный анализ проводились с использованием программного комплекса ZEMAX. Оптимизация конструктивных параметров осуществлялась по среднеквадратическому значению ошибки волнового фронта. Для минимизации габаритов разрабатываемых луп дополнительно были установлены ограничения на максимальное значение светового диаметра компонента, обращенного к предметной

Таблица 4. Оптические схемы разработанных вариантов бинокулярных луп

№ варианта	Оптическая схема	Производитель и марки оптических стекол
1		ЛЗОС: СТК3, ТФ5, ЛФ5
3		Schott: N-PSK53A, SF57, N-SF8, N-LAK10
7		Schott: N-PSK53A, SF57, N-SF8, N-LAK10
2		Schott: N-FK58, SF6, N-SF4, N-LASF43
6		CDGM: H-LAF1, ZF7L, H-LAF62, H-ZLAF68B
4		ЛЗОС: СТК19, Ф2, ТФ8
5		Schott: N-FK5, N-LASF40, N-SF66, N-LAK10

плоскости, и полную длину линзовой части оптической системы. Данные значения были установлены равными 22 мм для светового диаметра и 35 мм для полной длины линзовой части оптической системы.

В табл. 4 представлены оптические схемы полученных в ходе расчетов вариантов бинокулярных луп и использованные в них марки оптических стекол.

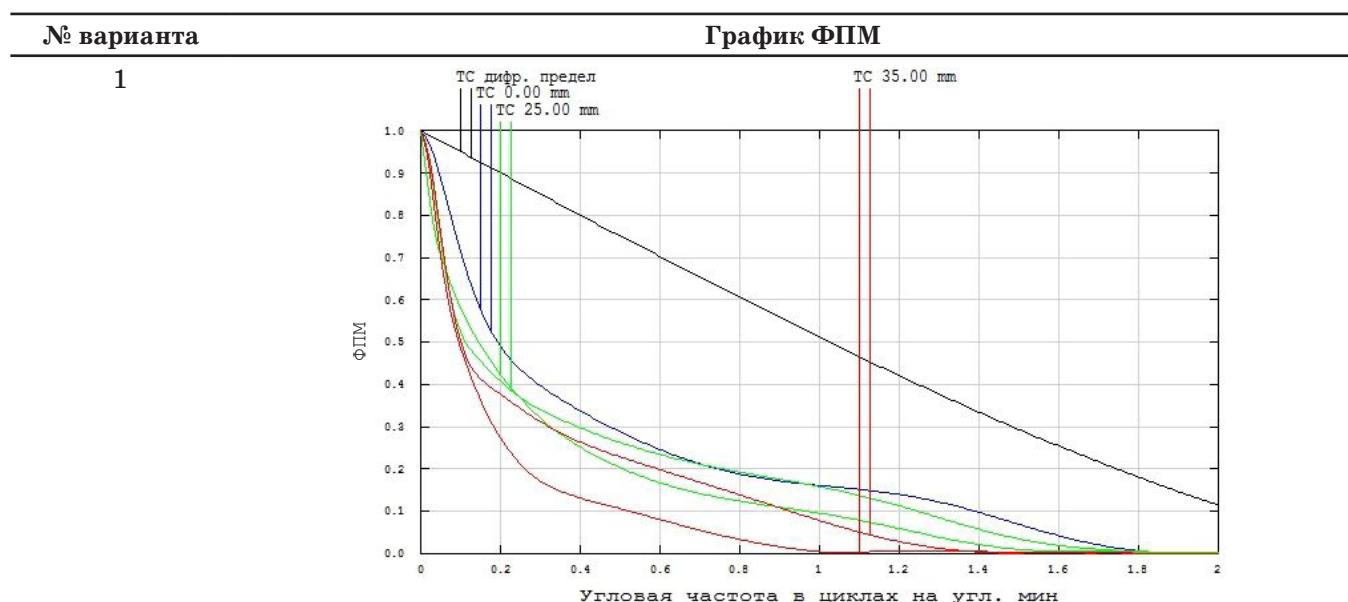
Технические характеристики полученных в ходе расчетов вариантов бинокулярных луп представлены в табл. 5, а их качественные характеристики — графики функции передачи модуляции (ФПМ), представлены в табл. 6.

Согласно работам [17–19], в которых исследовались зависимости ФПМ человеческого глаза от диаметра его зрачка, при диаметре зрачка 5 мм уровень контраста 0,2 наблюдается при угловой пространственной частоте 0,25 1/угл. мин. Сравнение данного значения со значениями пространственных частот, представленными в табл. 5, показывает, что разрешающая способность в центре поля зрения всех рассчитанных вариантов бинокулярных луп согласована с разрешающей способностью глаза наблюдателя. В то же время варианты 4 и 6 на краю поля зрения обладают значительно меньшей разрешающей способностью,

Таблица 5. Технические характеристики разработанных вариантов бинокулярных луп

№ варианта	Длина линзовой части, мм	Увеличение, крат	Рабочее расстояние, мм	Линейное поле в пространстве предметов, мм	Коэффициент виньетирования на краю поля зрения, отн. ед.	Значение пространственной частоты по уровню ФПМ 0,2, 1/угл. мин.	
						В центре поля зрения	На краю поля зрения
1	30	2,1	350	70	0,34	0,80	0,27
2	35	2,3	350	70	0,45	1,53	0,24
3	30	2,1	420	100	0,48	1,39	0,34
4	22,5	2,2	420	100	0,29	0,25	0,17
5	25	2,6	420	70	0,55	0,81	0,28
6	22	2,5	450	100	0,35	0,59	0,12
7	25,3	2,1	500	100	0,23	1,61	0,44

Таблица 6. Качественные характеристики разработанных вариантов бинокулярных луп

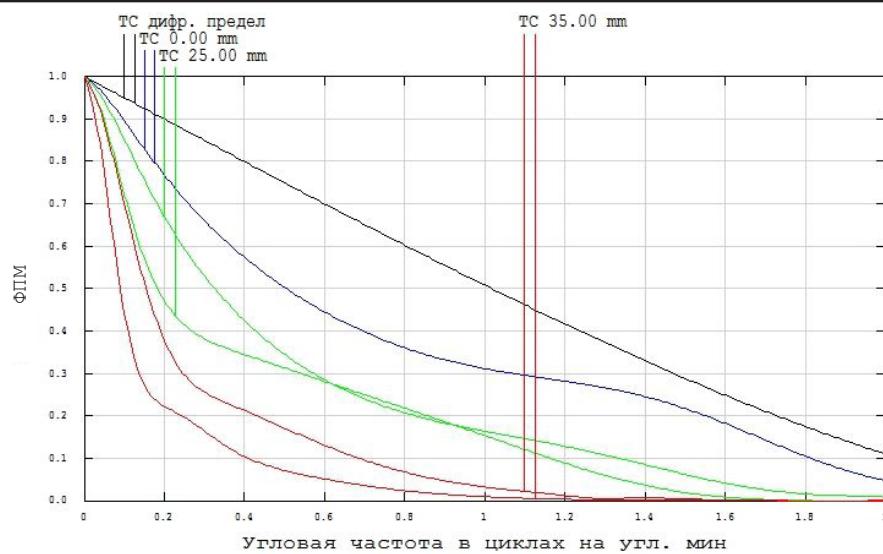


Продолжение табл. 6

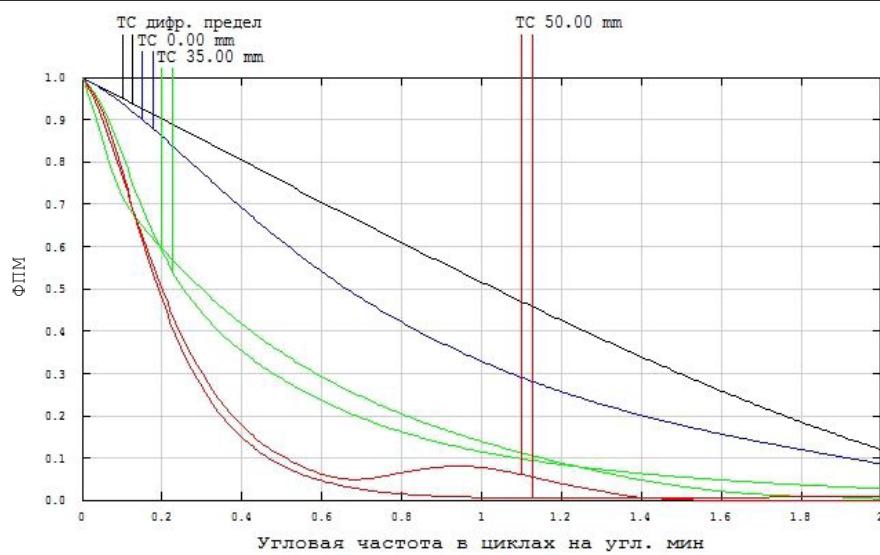
№ варианта

График ФПМ

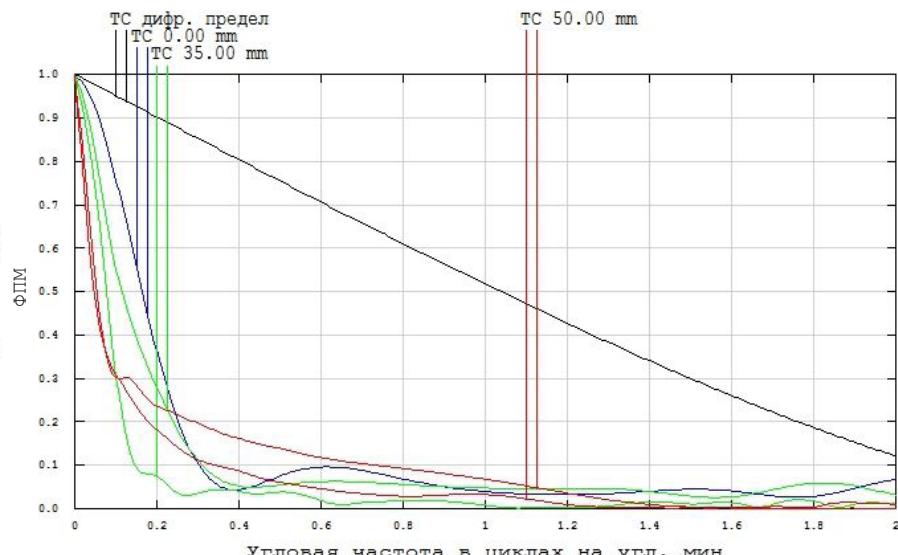
2



3



4

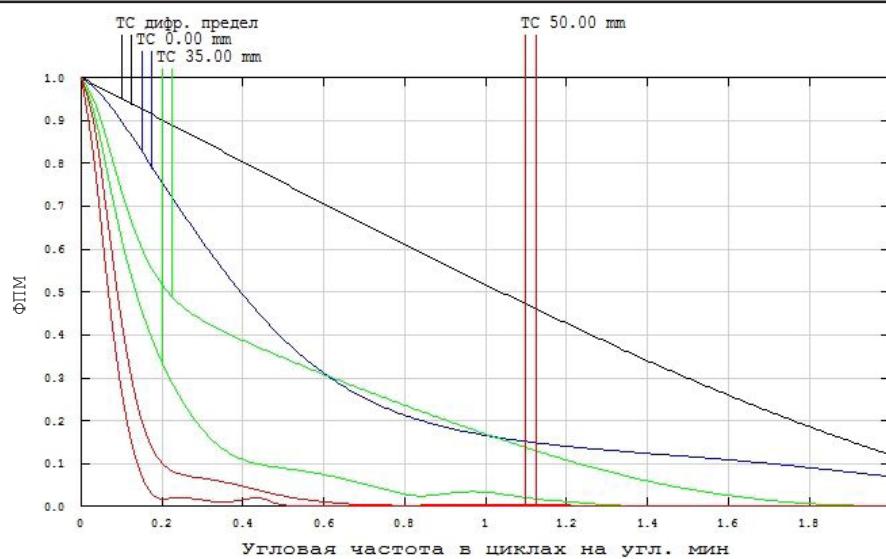


Окончание табл. 6

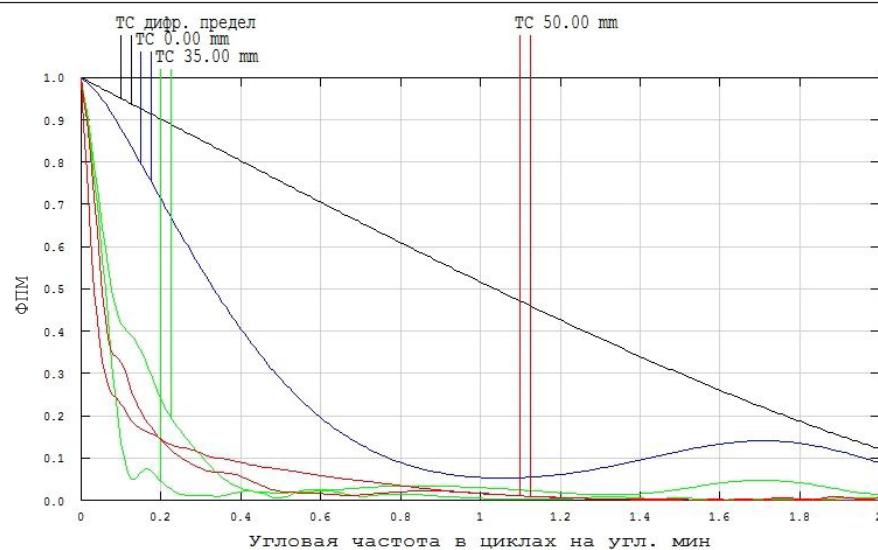
№ варианта

График ФПМ

5



6



7

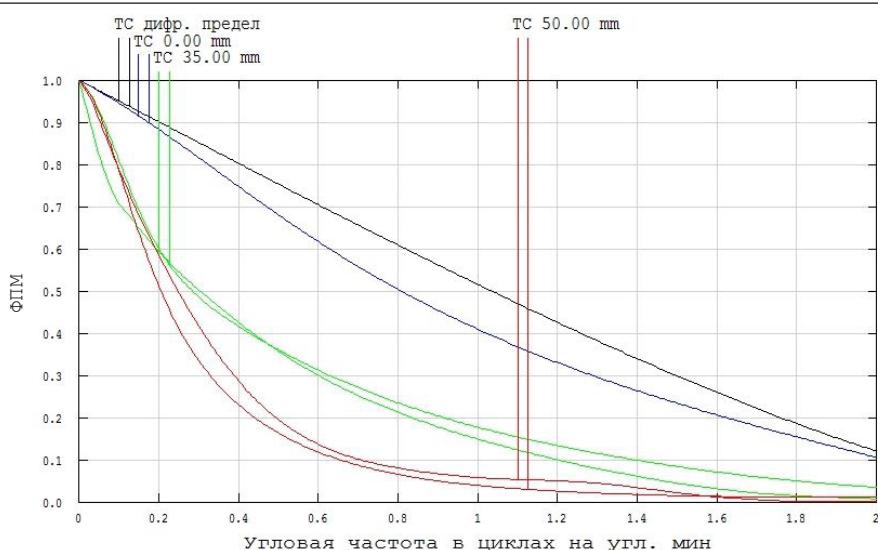


Таблица 7. Конструктивные параметры варианта 1

№ поверхности	Радиус, мм	Толщина, мм	Марка стекла
1	26,931	4,786	СТК3
2	-36,678	4,006	ТФ5
3	3792,532	15,417	воздух
4	22,414	3,507	ЛФ5
5	-12,000	2,349	СТК3
6	10,361	10,000	воздух
7 (А.Д.)	∞	∞	—

чем глаз наблюдателя, что отрицательно скажется на качестве наблюдения.

Анализ совокупности технических характеристик разработанных вариантов бинокулярных луп (см. табл. 5) позволяет предположить, что наибольший интерес для практической реализации в России может представлять вариант 1. По сравнению с остальными вариантами основными аргументами в пользу данного варианта можно назвать следующие: простота и технологичность конструкции — два двухлинзовых склеенных компонента и возможность получения технических характеристик, соответствующих выпускаемым в настоящее время мировым аналогам, с использованием оптического стекла отечественных марок.

В табл. 7 приведены возможные конструктивные параметры варианта 1 оптической системы бинокулярной лупы.

В ходе настоящей работы были проанализированы история развития и современные аспекты применения бинокулярных луп в ме-

дицине. Проведенный анализ позволил оценить актуальность расчета оптических систем бинокулярных луп в наши дни, определить основные технические характеристики, которым должны соответствовать разрабатываемые оптические системы, а также сформулировать основные этапы разработки данных оптических систем. Представленные результаты анализа обусловливают научную новизну данной работы. Практическая значимость работы подтверждается предлагаемыми вариантами оптических схем, расчет которых проводился в соответствии с упомянутыми выше положениями.

Данные схемы обладают простотой конструкции и используют коммерчески доступные марки оптических стекол. Таким образом, они могут быть использованы для изготовления на базе отечественных оптических производств линейки медицинских бинокулярных луп, сопоставимых по техническим характеристикам с продукцией ведущих мировых производителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Keeler R. The evolution of the ophthalmic surgical microscope // Hist. Ophtal. Intern. 2015. V. 1. P. 35–66.
2. Baker J.M., Meals R.A. A practical guide to surgical loupes // J. Hand Surgery. 1997. V. 22A. P. 967–974.
3. McClelland E., Marzouk S., Coyle P., et al. Optical loupes: A useful tool for the oncall otolaryngologist — our experience // Indian J. Otolaryngol. Head Neck Surg. 2019. V. 71. P. 137–141.
4. James T., Gilmour A.S.M. Magnifying loupes in modern dental practice: An update // Dental Update. 2010. V. 37. P. 633–636.
5. Hayes M.J., Taylor J.A., Smith D.R. Introducing loupes to clinical practice: Dental hygienists experiences and opinions // Internat. J. Dental Hygiene. 2015. V. 14(3).
6. Wajngarten D., Garcia P.P.N.S. Effect of magnification devices on dental students' visual acuity // PLoS ONE. 2019. V. 14(3): e0212793. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212793>
7. Nalini Doppalapudi, Ravindra Kumar Burugapalli. Benefits of utilization of magnification in dentistry: A review // Dental Research and Oral Health. 2020. № 3. P. 121–128.

8. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.Н. Теория оптических систем: уч. пособ. 4-е изд. СПб: изд. «Лань», 2008. 446 с.
9. *Haiyin Sun*. Lens design: A practical guide. CRC Press, 2017. 374 p.
10. *Mamoun J., Wilkinson M.E.* Technical aspects and clinical usage of Keplerian and Galilean binocular surgical loupe telescopes used in dentistry or medicine // Open Access Dental Lecture № 2. January. 2013.
11. *Feinbloom W.* Bifocal loupes and telemicroscopic lenses therefor // Патент США № US3273456. 1966.
12. *Caplan C.H., Buchreeder R.A.* Through-The-Lens binocular viewer // Патент США № US 6061189 A. 2000.
13. *Kvamme D.F., Kim R.C.* High-magnification wide-field-of-view telemicroscopic lens configuration // Патент США № US 5394272 A. 1995.
14. *Caplan C.H., Buchreeder R.A.* Light-weight three-element clinical viewer // Патент США № US 6163413 A. 2000.
15. *Caplan C.H., Buchreeder R.A.* Light-weight high-magnification clinical viewer // Патент США № US 5790323 A. 1998.
16. *Byung Jin Chang*. Telemicroscopic loupes with removable, replaceable lens cap to adjust for working distance // Патент США № US 7673989 B2. 2010.
17. *Campbell F.W., Gubish R.W.* Optical quality of the human eye // J. Physiol. 1966. V. 186. P. 558–578.
18. *Watson A.* A formula for the mean human optical modulation transfer function as a function of pupil size // J. Vision. 2013. V. 13(6). № 18. P. 1–11.
19. *Artal P., Navarro R.* Monochromatic modulation transfer function of the human eye for different pupil diameters: An analytical expression // JOSA. 1994. V. 11. № 1. P. 246–249.