

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА,
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ

ELECTRONICS, PHOTONICS,
INSTRUMENT MAKING
AND COMMUNICATIONS

УДК 681.78

DOI: 10.17212/2782-2001-2025-4-159-171

Жидкостный ахроматический объектив-дублет с электромагнитным приводом*

А.С. ВОЙТОВ

РФ, 664033, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, Сибирский государственный университет геосистем и технологий

avojtov33@gmail.com

Устойчивая тенденция к развитию беспилотных аппаратов приводит к уменьшению их габаритов для достижения минимальной заметности при выполнении разведывательной деятельности. В связи с этим необходимо усовершенствовать составные части беспилотного аппарата, в том числе и системы фото- и видеофиксации. Для решения этого вопроса предлагается использовать жидкие линзы, которые позволяют уменьшить время отклика, получить компактный корпус и надежную конструкцию устройства. В последнее время появилось много информации по построению и технологии изменения фокусного расстояния, жидкостных объективов, конструкции жидкостных устройств и используемых в них жидкостей. Однако не уделено должное внимание критериям оценки качества таких систем. В статье рассматривается практическое подтверждение взаимосвязи показателя преломления (n_D) и коэффициента дисперсии Аббе (v_D) жидкостей, образующих дублет, с возможностью получения ахроматического типа коррекции для хроматизма положения ($\Delta s'$). Достижение цели происходит с использованием жидкостного объектива-дублета с разными значениями показателей преломления (n_D) и коэффициента дисперсии, Аббе (v_D) и оценки их влияния на изменения хроматизма положения ($\Delta s'$).

Отраженная в работе экспериментальная часть касается жидкостного объектива-дублета с электромагнитным приводом, который использует силу Лоренца для изменения радиуса кривизны эластичной мембраны, что, в свою очередь, приводит к изменению фокусного расстояния. Полученная модель дублета может работать как с расходящимся, так и со сходящимся пучком лучей в зависимости от полярности подаваемого напряжения, что и имеет относительно широкий диапазон фокусных расстояний.

Ключевые слова: жидкостный объектив-дублет, электромагнитный привод, эластичная мембрана, задний фокальный отрезок, показатель преломления, коэффициент дисперсии Аббе, хроматизм положения, хроматизм увеличения

* Статья получена 11 июня 2025 г.

ВВЕДЕНИЕ

Жидкостный объектив-дублет – это оптический узел, который обеспечивает динамическое изменение фокусного расстояния без механического перемещения его составляющих. Такая особенность работы предоставляет дополнительную степень свободы разработчикам оптических устройств. Кроме того, устройствам обработки изображений с перестраиваемым объективом не требуется поступательного перемещения линзы для фокусировки, поскольку фокусировку можно выполнить путем настройки самого фокусного расстояния. Отсутствие подвижного корпуса объектива, встречающегося в большинстве традиционных устройств получения изображений, обеспечивает более быстрое время отклика, компактный корпус и надежную конструкцию устройства. Для реализации возможности перестройки фокуса были предложены и использованы различные механизмы (например, жидкокристаллические, полимерные и чаще всего линзы с перестраиваемым фокусным расстоянием, заполненные жидкостью) [1].

Жидкостные объективы-дублеты с регулируемым фокусным расстоянием используют различные жидкости: метанол, уксусную кислоту, глицерин, изопропанол и другие. Как правило, это делается одним из двух способов: либо с использованием двух несмешивающихся жидкостей, либо с использованием мембраны, которая предотвращает смешивание. Мембрана может быть между жидкостью и воздухом или между двумя разными жидкостями. В то время как жидкие линзы без мембраны обычно основаны на явлении электросмачивания для приведения в действие, объективы-дублеты с мембраной могут приводиться в действие с помощью механизмов. Благодаря почти несжимаемости жидкостей можно использовать множество различных приводов, включая пневматические, электросмачивающие, магнитные, электромагнитные, пьезоэлектрические, электростатические, диэлектрофоретические или любые другие, которые могут быть соединены с герметичной жидкостной камерой для обеспечения настройки фокуса [2].

Электромагнитные приводы обладают важным преимуществом – чрезвычайно малым временем отклика, достигающим 2...3 мс. Они также способны генерировать значительные силы, необходимые для обеспечения большой деформации мембраны, что позволяет расширить диапазон возможных фокусных расстояний объектива-дублета [1].

В последнее время появилось много информации о принципах построения и технологии изменения фокусного расстояния жидкостных объективов, конструкциях жидкостных устройств и используемых в них жидкостях, но не уделено должного внимания критериям оценки качества таких систем. В патенте [3] описано создание ахроматической оптической системы в таких системах. Однако внедрение жидкостных элементов предназначено для получения необходимого фокусного расстояния, а устранение хроматической аберрации берут на себя полимерные линзы. В статье [4] показано использование нескольких жидкостных дублетов. В статье [5] представлена зум-камера, в которой используется сочетание жидкостных дублетов с линзами: конструкция имеет недостаточно малый размер для применения в микрооптических системах.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Используя теорию подбора ахроматической пары [6], выполним следующие условия:

– большему значению показателя преломления соответствует большее значение дисперсии, а жидкости с меньшим значением преломления – меньшее значение дисперсии;

– отношение оптической силы жидкостных элементов равно или приблизительно равно отношению показателей дисперсии этих жидкостей.

Принимая во внимание вышеизложенные условия, конструкция объектива-дублета предусматривает наличие двух камер, заполненных жидкостями. Первая камера будет заполнена глицерином с показателем преломления 1,473 и коэффициентом дисперсии 66,4; вторая камера – изопропанолом с показателем преломления 1,377 и коэффициентом дисперсии 53,8. Подвижная мембрана, расположенная в кольцевой диафрагме, служит для разделения этих жидкостей. Диафрагма, в свою очередь, собрана из кольцевого магнита и стального кольца, между которыми зажата силиконовая мембрана. Индукционная катушка установлена на внешней поверхности пластикового корпуса [1]. Схематическое представление жидкостного объектива-дублета показано на рис. 1.

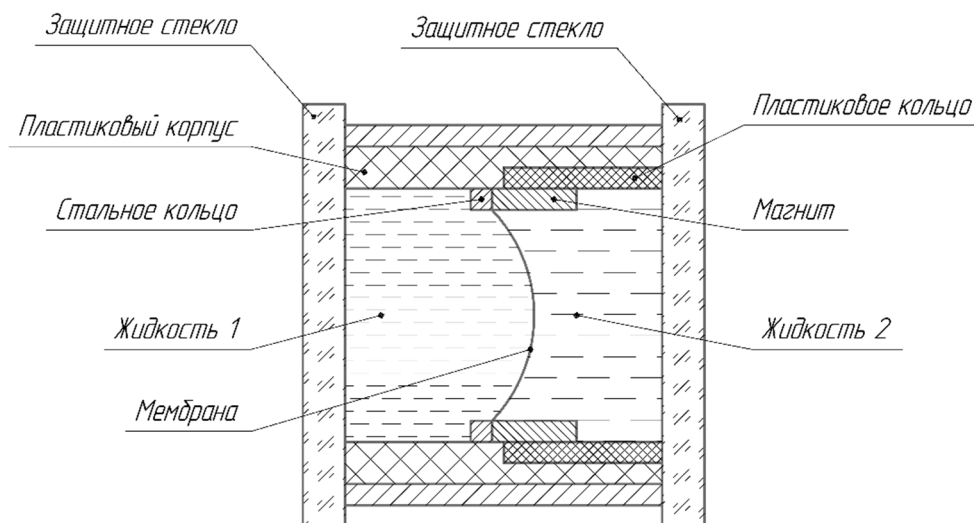


Рис. 1. Схема устройства объектива-дублета

Fig. 1. The schematic diagram of the doublet lens device

По сравнению с ранее описанной конструкцией с магнитным приводом [2, 7–9], основанной на осевом магнитном поле, предлагаемая конструкция увеличивает диапазон движения диафрагмы, что, в свою очередь, увеличивает диапазон изменения фокусного расстояния. Защитные стекла (плоскопараллельные пластины) предохраняют объектив-дублет от внешних воздействий [6], а наличие двух камер позволяет подобрать хроматическую пару для устранения хроматической аберрации положения.

При подаче постоянного тока через индукционную катушку создается магнитное поле. В зависимости от полярности диафрагма движется в правую

или левую сторону. При движении диафрагмы в левую сторону глицерин вытесняется по краям камеры. Поскольку жидкости несжимаемые и объем камеры постоянен, вытесненный объем глицерина переносится в центральную область камеры, где силиконовая мембрана искривляется вправо и тем самым создает определенный радиус кривизны [10].

Если направление напряжения меняется, то диафрагма двигается в правую сторону. В таком случае изопропанол вытесняется по краю камеры, а объем жидкости перетекает в центральную часть камеры, что, в свою очередь, вызывает искривление мембраны в левую сторону.

В зависимости от приложенного напряжения изменяется диапазон перемещения диафрагмы. Таким образом, изменение фокусного расстояния зависит от величины напряжения, а оптическая сила линзы определяется полярностью напряжения.

Существуют и другие факторы, влияющие на работу жидкостного блока: магнитное поле постоянного магнита, количество витков в катушке, материал проволоки. Материал, толщина и эластичность мембраны влияют на перемещение диафрагмы мембраны [2, 12].

2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ МОДЕЛИ ОБЪЕКТИВА-ДУБЛЕТА

Для изготовления корпуса объектива-дублета был использован фотополимерный принтер. Этот выбор связан с высокой точностью печати, которая достигает 0,01 мм. Корпус состоит из двух деталей: основной части и кольца, которые должны плотно прилегать друг к другу во время монтажа. Наличие небольшого запаса пленки будет предотвращать протечки в изделии. В качестве материала защитного стекла было выбрано оргстекло. Этот выбор связан с тем, что оптическая смола, которая используется в SLA-печати (Stereolithography Apparatus, лазерная стереолитография), имеет низкое светопропускание и высокую стоимость [13].

Индукционная катушка изготовлена из медной проволоки с диаметром сечения 0,5 мм, покрытой нейлоновым изолятором. Такая проволока используется в трансформаторах. Для эффективной работы катушки необходимо максимально плотно укладывать витки относительно друг друга. Для намотки катушки требуется около 10 метров медной проволоки (примерно 100 витков).

После подготовки всех составных частей объектива-дублета выполнена его сборка. На первом этапе собирается диафрагма: на кольцевом магните располагается эластичная мембрана, которая фиксируется за счет стального кольца. Магнитное явление, происходящее между магнитом и кольцом, надежно фиксирует мембрану. Такой способ прост в исполнении и не требует дополнительного крепления. В результате анализа рынка материалов было выявлено, что на рынке представлено достаточное количество всевозможных материалов, которые подходят под задачи, поставленные в этой статье. Мембрана изготовлена из поливинилхлорида.

Следующим этапом является установка диафрагмы в основной корпус. Установка диафрагмы происходит за счет прижимного кольца, которое прижимает мембрану по периферии к корпусу. Важным моментом во время монтажа является сохранение линейного перемещения диафрагмы в посадочном

диаметре. Этот параметр можно проконтролировать за счет второго магнита, который в результате приближения будет отталкивать или притягивать диафрагму в зависимости от полюса магнита. На рис. 2 представлен внешний вид объектива-дублета.

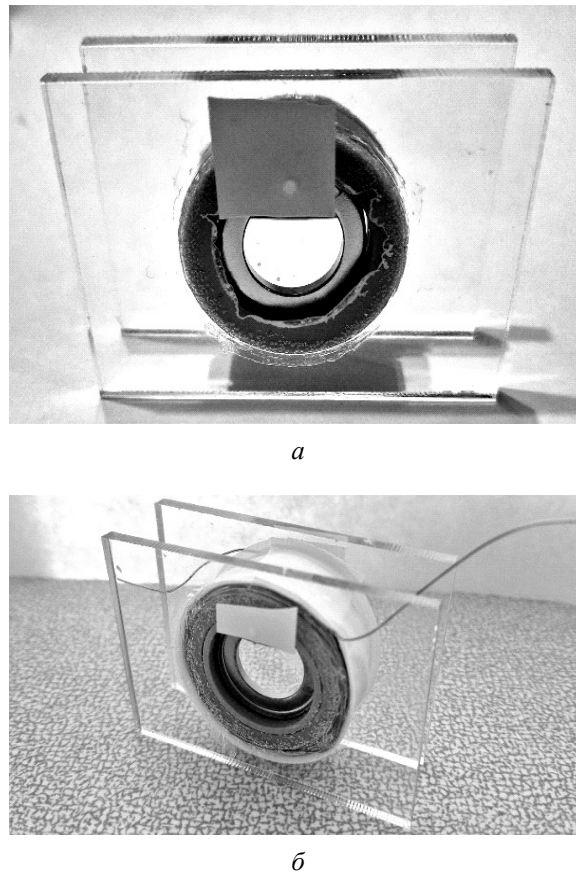


Рис. 2. Этапы сборки макета объектива-дублета:
a – монтаж плоскопараллельных пластин; *б* – положение
индукционной катушки относительно корпуса

Fig. 2. The assembly stages of the doublet lens model:
a is the installation of plane-parallel plates; *b* is the position
of the induction coil relative to the housing

Далее монтируют защитные стекла (оргстекло) по торцам корпуса при помощи термостойчивого клея для одновременной фиксации оргстекла и предотвращения протечки жидкости. Предварительно в оргстекле сверлят отверстия для заливки жидкостей в камеры.

Этап заполнения линзы жидкостью. Заливку проводят через отверстия в защитных стеклах путем медленного «впрыска» глицерина в первую камеру и изопропанола во вторую. В процессе заливки необходимо контролировать форму мембраны, сохраняя ее «плоской», с помощью равномерного заполнения объема двух камер.

3. ИЗМЕРЕНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАДНЕГО ФОКАЛЬНОГО ОТРЕЗКА И ХРОМАТИЧЕСКОЙ АБЕРРАЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТИВА-ДУБЛЕТА

Для эффективной работы объектива-дублета необходимо измерить его задний фокальный отрезок рассеивающей и собирающей линзы. Измерения выполняют на оптической скамье. В качестве источника постоянного напряжения используют лабораторный источник питания.

Схема установки приведена на рис. 3. На оптическую скамью 1 устанавливают в рейтерах 2 коллиматор 3, диск для светофильтров 4, светофильтр 5, пружинный фиксатор 6, исследуемый дублет 7, микроскоп 11 с механизмом перемещения 8. В коллиматоре 3 размещают источник света – электрическую лампу накаливания 13 с точечной диафрагмой 14, питание которой осуществляется от сети переменного тока от осветителя 15, и объектив 12, формирующий на выходе из коллиматора параллельный пучок лучей. Осветитель 15 имеет выключатель 17 и реостат 16 для изменения напряжения, подаваемого на лампу накаливания. На диске 4 установлены светофильтры: красный, желтый, зеленый и синий. Смену светофильтров осуществляют поворотом диска вокруг его оси [14].

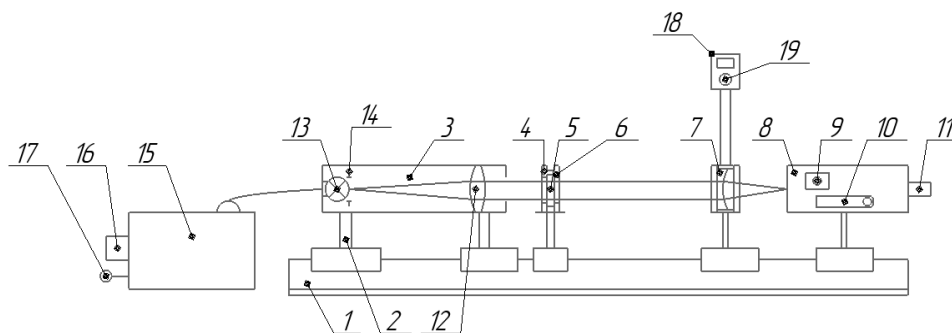


Рис. 3. Схема установки для измерения и определения параметров объектива-дублета

Fig. 3. Schematic diagram of the setup for measuring and determining the parameters of a doublet lens

В ходе настоящего исследования положение заднего фокального отрезка объектива-дублета определялось путем наблюдения за резкостью изображения точечной диафрагмы 13 через микроскоп 11. Для перемещения микроскопа вдоль оптической оси использовали механизм 8, управляемый ручкой 10. Точность отсчета перемещения определяли линейкой 9, оснащенной вспомогательной шкалой-нониусом. Рейтеры, несущие исследуемый дублет 7 и микроскоп 11, оборудованы механизмом типа «ласточкин хвост». Этот механизм при вращении регулировочных винтов позволяет осуществлять точные вертикальные и горизонтальные перемещения объектива-дублета и микроскопа, что необходимо для дальнейших отсчетов с экспериментальной установки.

К объективу-дублету подключен лабораторный источник питания 18. При помощи переключателя 19 выполняют настройку величины напряжения, которое подается на индукционную катушку объектива-дублета 7. Во время

испытаний подается напряжение от 10 до 1 В и от –10 до –1 В с интервалом в 0,5 В.

Результаты измерения заднего фокального отрезка объектива-дублета при подаче напряжения представлены в табл. 1. Напряжение изменялось в прямом и обратном направлении для определения гистерезиса. Кроме того, в таблицу включены расчетные значения для f' и R_m , соответствующие измеренным $S_{f'}$.

Таблица 1

Table 1

Результаты измерения заднего фокального отрезка объектива-дублета

Measurement results of the rear focal length of the doublet lens

Изменение значений параметров жидкостного дублета от напряжения						
V, В	При изменении напряжения, В					
	от 1 до 10 (прямое)			от 10 до 1 (обратное)		
	Измеренные	Расчетные		Измеренные	Расчетные	
	$S_{f'}$, мм	f' , мм	R_m , мм	$S_{f'}$, мм	f' , мм	R_m , мм
1,0	1042	1045,5	98,6	1052	1056,1	99,5
1,5	983	987,0	93,0	993	997,7	94,0
2,0	846	850,1	80,1	855	859,7	81,0
2,5	729	733,4	69,1	739	742,9	70,0
3,0	592	596,4	56,2	582	586,9	55,3
3,5	534	538,1	50,7	534	538,1	50,7
4,0	495	498,8	47,0	488	492,4	46,4
4,5	455	459,5	43,3	441	450,0	42,4
5,0	420	420,3	39,6	416	420,3	39,6
5,5	397	401,1	37,8	401	405,4	38,2
6,0	377	381,0	35,9	378	382,0	36,0
6,5	358	361,9	34,1	360	364,0	34,3
7,0	346	350,2	33,0	346	350,2	33,0
7,5	332	336,4	31,7	330	334,3	31,5
8,0	315	319,4	30,1	313	317,3	29,9
8,5	300	303,5	28,6	299	303,5	28,6
9,0	290	293,9	27,7	290	293,9	27,7
9,5	283	286,6	27,1	285	289,7	27,3
10,0	280	284,4	26,8	276	275,9	26,9

В процессе снятия отчета выяснилось, что наибольшая погрешность измерения проявлялась при больших фокусных расстояниях. Это связано с тем, что при очень больших радиусах мембраны фокусное расстояние становится очень чувствительным даже к небольшим изменениям приложенного напряжения. Систематическая погрешность установки в значительной степени обусловлена предельной систематической погрешностью линейки с нониусом, составляющей 0,1 мм.

Внутренний диаметр кольцевого магнита 17 мм, после определения заднего фокального отрезка можно сделать вывод, что относительное отверстие объектива-дублета в пределах от 1:16,6 до 1:62,5.

На рис. 4 представлен график зависимости заднего фокального отрезка от приложенного напряжения.

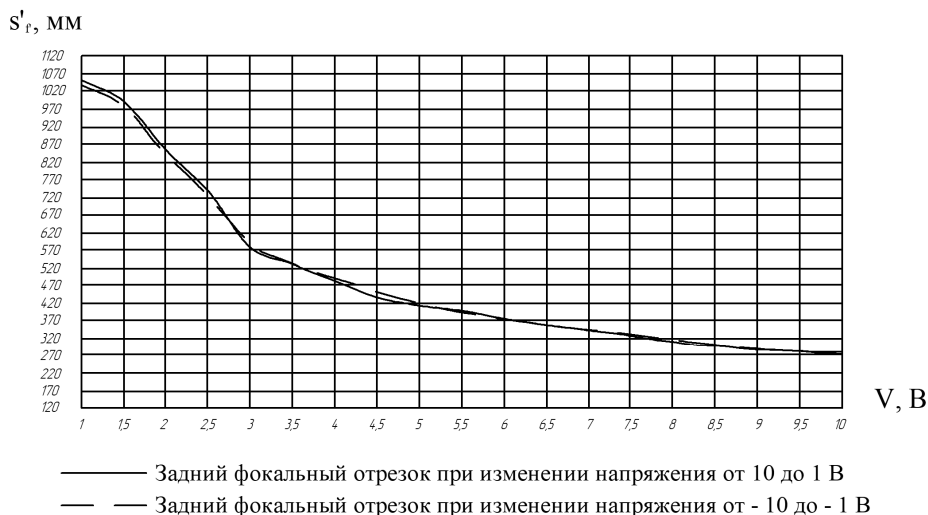


Рис. 4. Зависимость заднего фокального отрезка от приложенного напряжения

Fig. 4. Dependence of the rear focal segment on the applied voltage

Определение хроматической аберрации проводили также при помощи установки, схема которой показана на рис. 3. Для выделения узкого диапазона длин волн использовали комбинации светофильтров согласно ГОСТ 9411–91 [15]. Измерения проводили при радиусах мембраны –30, –35 и –40 мм. Выбор такого узкого диапазона фокусных расстояний связан с удобством их измерения. Для повышения точности определения хроматической аберрации на измерительном микроскопе устанавливали дополнительную насадку, что увеличило точность измерения до 0,01 мм. В табл. 2 представлены результаты измерения хроматической аберрации.

Таблица 2

Table 2

Результаты измерения хроматической аберрации положения

Measurement results of the chromatic position aberration

λ , нм	Смещение фокальной плоскости (мм) при $R_m = -30$ мм	Смещение фокальной плоскости (мм) при $R_m = -35$ мм	Смещение фокальной плоскости (мм) при $R_m = -40$ мм
435...480	0,04	0,16	0,2
530...560	0	0	0
580...595	0,05	0,07	0,08
595...605	0,08	0,09	0,11
640...680	0,18	0,24	0,3

По полученным из табл. 2 данным были построены графики смещения задней фокальной плоскости при разных длинах волн (рис. 5–7).

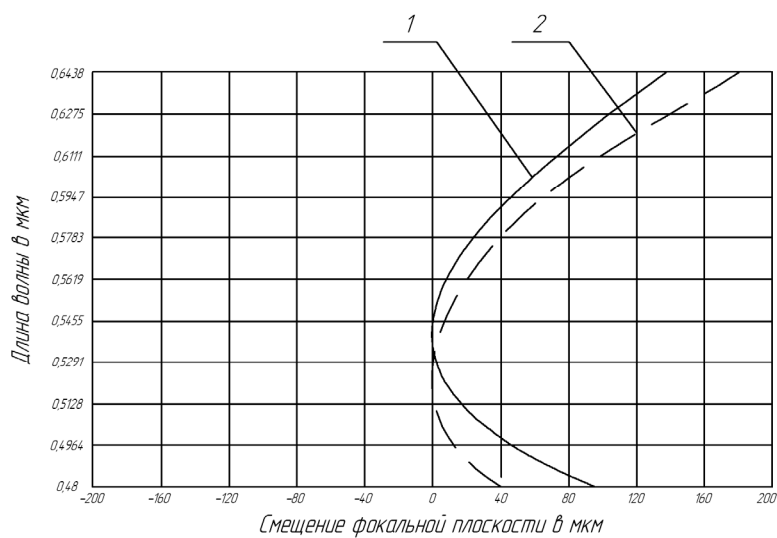


Рис. 5. График смещения задней фокальной плоскости при радиусе мембраны $R_m = -30$ мм:

1 – расчетный; 2 – измеренный

Fig. 5. Graph of the rear focal plane shift with the membrane radius $R_m = -30$ mm:

1 is calculated; 2 is measured

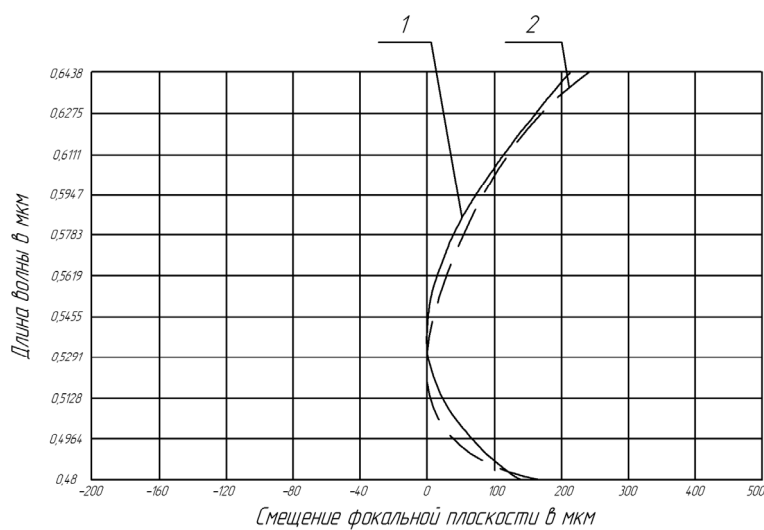


Рис. 6. График смещения задней фокальной плоскости при радиусе мембраны $R_m = -35$ мм:

1 – расчетный; 2 – измеренный

Fig. 6. Graph of the rear focal plane shift with the membrane radius $R_m = -35$ mm:

1 is calculated; 2 is measured

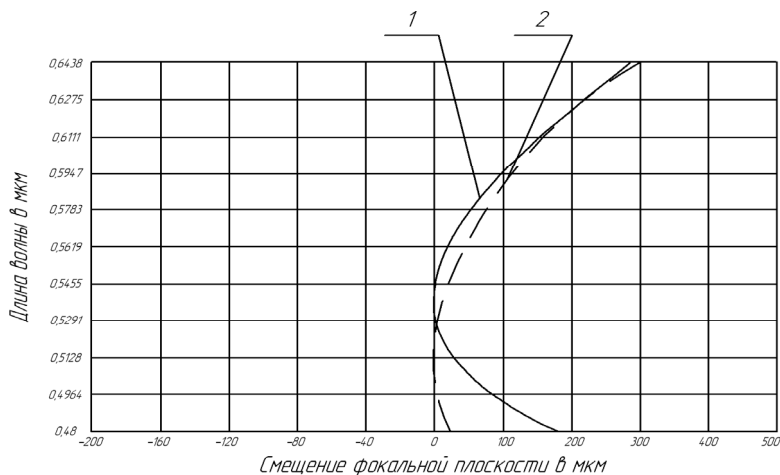


Рис. 7. График смещения задней фокальной плоскости при радиусе мембраны $R_m = -40$ мм:

1 – расчетный; 2 – измеренный

Fig. 7. Graph of the rear focal plane shift with the membrane radius $R_m = -40$ mm:

1 is calculated; 2 is measured

Проведено сравнение графиков хроматической аберрации компьютерной модели и макета жидкостного объектива-дублета, управляемого электромагнитным устройством, для диапазона спектра 0,486...0,656 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенной работы была экспериментально подтверждена теория подбора оптических жидкостей, у которых большему значению n_D соответствует большее значение v_D и жидкости с меньшим значением n_D соответствует меньшее значение v_D , что приводит к возможности получения ахроматического типа коррекции продольного хроматизма.

Найденная закономерность комбинации параметров жидкостей не влияет на способ управления радиусом мембраны, а значит, может быть применена для любого типа жидкостных систем [6].

Разработана эффективная модель объектива-дублета с возможностью комбинации жидкостей.

Измерение заднего фокального отрезка в прямом и обратном порядке показало незначительное явление гистерезиса, что, в свою очередь, не будет негативно влиять на скорость работы электромагнитного привода объектива-дублета.

Значения измеренных и расчетных параметров показали высокую сходимость результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Войтов А.С., Ефремов В.С. Разработка и исследование жидкостного объектива-дублета с электромагнитным приводом // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2024. – Т. 8, № 1. – С. 53–56.

2. Van Grinsven K.L., Ousati Ashtiani A., Jiang H. Lorentz force actuated tunable-focus liquid lens // *Micromachines* (Basel). – 2019. – Vol. 10 (10). – P. 714. – DOI: 10.3390/mi10100714.
3. Патент No. US10962771B2. Achromatic optical system with liquid lens: 2016 / Man Kit Louis Wai.
4. Reichelt S., Zappe H. Design of spherically corrected, achromatic variable-focus liquid lenses // *Optics Express*. – 2007. – Vol. 15 (21). – P. 14146–14154. – DOI: 10.1364/OE.15.014146.
5. Zoom camera based on liquid lenses / S. Kuiper, B.H.W. Hendriks, J.F. Suijver, S. Deladi, I. Helwegen // *Proceedings of SPIE*. – 2007. – Vol. 6466: MOEMS and Miniaturized Systems VI. – DOI: 10.1117/12.706779.
6. Войтов А.С., Егоренко М.П., Ефремов В.С. Выбор параметров жидкостей для коррекции хроматизма в жидкостных объективах // *Оптический журнал*. – 2025. – Т. 92, № 4. – С. 82–92. – DOI: 10.17586/1023-5086-2025-92-04-82-92.
7. Electromagnetic drive zoom deflection liquid lens. – URL: https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN357089143&_cid=P11-LO9Y8Q-51086-1 (accessed: 28.11.2025).
8. Design method of electromagnetic drive bidirectional zoom liquid lens. – URL: https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN346613533&_cid=P11-LO9Y8Q-51086-1 (accessed: 28.11.2025).
9. Zoom liquid lens based on electromagnetic drive. – URL: https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN245679990&_cid=P11-LO9Y8Q-51086-1 (accessed: 28.11.2025).
10. Патент № 2826524 Российская Федерация. Жидкостный вариообъектив, управляемый электромагнитным устройством: опубл. 11.09.2024 / Войтов А.С., Егоренко М.П., Ефремов В.С.
11. Патент № RU2802534C1 Российская Федерация. Двухдиапазонный жидкостный вариообъектив на основе эффекта электросмачивания: опубл. 30.08.2023, Бюл. № 25 / Войтов А.С., Егоренко М.П., Ефремов В.С.
12. Войтов А.С., Михайлов И.О. Перспективы использования жидких линз в объективах фото- и видеотехники беспилотных летательных аппаратов // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. – 2019. – Т. 6, № 1. – С. 134–140.
13. Преимущества и недостатки стекол из оптической смолы. 2017. – URL: <http://ru.youjie-tools.com/news/advantages-and-disadvantages-of-optical-resin-38284382.html> (дата обращения: 28.11.2025).
14. Рогачев Н.М., Баландина Б.Ю. Аберрации оптических систем: методическое пособие. – Самара : Изд-во СГАУ, 2012. – 11 с.
15. ГОСТ 9411–91. Стекло оптическое цветное. Технические условия: дата введ. 1993–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 48 с.

Войтов Алексей Сергеевич, ассистент (совместитель) кафедры фотоники и приборостроения Сибирского государственного университета геосистем и технологий. Основное направление научных статей – жидкостные оптические системы. Имеет более 10 печатных работ. E-mail: avojtov33@gmail.com

Voitov Alexey S., assistant lecturer (part-time) at the Department of Photonics and Instrumentation in the Siberian State University of Geosystems and Technologies. His research interests are currently focused on liquid optical systems. He has more than 10 publications. E-mail: avojtov33@gmail.com

Liquid achromatic doublet lens with an electromagnetic drive*

A.S. VOYTOV

*Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10 Plakhotnogo Street, Novosibirsk, 664033, Russian Federation**avojtov33@gmail.com***Abstract**

The steady trend towards the development of unmanned aerial vehicles (UAVs) leads to a reduction in their size to achieve minimal visibility for reconnaissance missions. Therefore, it is necessary to improve the components of UAVs, including photo and video recording systems. To solve this problem, it is proposed to use liquid lenses. Such lenses make it possible to reduce the response time, get a compact body and a reliable device design. In recent years, a lot of information has appeared on the principles of construction and technology of changing the focal length, liquid lenses, the design of liquid devices and the liquids used in them. However, due attention has not been paid to the criteria for evaluating the quality of such systems. This work is based on practical validation of the relationship between the refractive index (n_D) and the Abbe dispersion coefficient (v_D) of liquids forming a doublet, with the possibility of obtaining an achromatic type of correction for position chromaticity ($\Delta s'$). The goal is achieved using a liquid doublet lens with different values of refractive indices (n_D) and dispersion coefficient, Abbe (v_D), and an assessment of their effect on changes in position chromaticity ($\Delta s'$).

The experimental part reflected in the work concerns a liquid doublet lens with an electromagnetic drive, which uses the Lorentz force to change the radius of curvature of the elastic membrane, which in turn leads to a change in the focal length. The resulting doublet model can work with both diverging and converging beams, depending on the polarity of the applied voltage, and has a relatively wide range of focal lengths

Keywords: liquid doublet lens, electromagnetic drive, elastic membrane, rear focal length, refractive index, Abbe dispersion coefficient, position chromaticism, magnification chromaticism

REFERENCES

1. Voytov A.S., Efremov V.S. Razrabotka i issledovanie zhidkostnogo ob'ektiva-dubleta s elektromagnitnym privodom [Development and research of a liquid doublet lens with an electromagnetic drive]. *Interexpo Geo-Sibir' = Interexpo Geo-Siberia*, 2024, vol. 8, no. 1, pp. 53–56.
2. Van Grinsven K.L., Ousati Ashtiani A., Jiang H. Lorentz force actuated tunable-focus liquid lens. *Micromachines (Basel)*, 2019, vol. 10 (10), p. 714. DOI: 10.3390/mi10100714.
3. Man Kit Louis Wai. *Achromatic optical system with liquid lens*. U.S. Patent no. US10962771B2, 2016.
4. Reichelt S., Zappe H. Design of spherically corrected, achromatic variable-focus liquid lenses. *Optics Express*, 2007, vol. 15 (21), pp. 14146–14154. DOI: 10.1364/OE.15.014146.
5. Kuiper S., Hendriks B.H.W., Suijver J.F., Deladi S., Helwegen I. Zoom camera based on liquid lenses. *Proceedings of SPIE*, 2007, vol. 6466. *MOEMS and Miniaturized Systems VI*. DOI: 10.1117/12.706779.
6. Voytov A.S., Egorenko M.P., Efremov V.S. Vybore parametrov zhidkostei dlya korrektsii khromatizma v zhidkostnykh ob'ektivakh [Selection of liquid parameters for chromaticity correction in liquid lenses]. *Opticheskii zhurnal = Journal of Optical Technology*, 2025, vol. 92, no. 4, pp. 82–92. DOI: 10.17586/1023-5086-2025-92-04-82-92.

* Received 11 June 2025.

7. *Electromagnetic drive zoom deflection liquid lens*. Available at: https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN357089143&_cid=P11-LO9Y8Q-51086-1 (accessed 28.11.2025).
8. *Design method of electromagnetic drive bidirectional zoom liquid lens*. Available at: https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN346613533&_cid=P11-LO9Y8Q-51086-1 (accessed 28.11.2025).
9. *Zoom liquid lens based on electromagnetic drive*. Available at: https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN245679990&_cid=P11-LO9Y8Q-51086-1 (accessed 28.11.2025).
10. Voytov A.S., Egorenko M.P., Efremov V.S. *Zhidkostnyi varioob"ektiv, upravlyaemyi elektromagnitnym ustroystvom* [Liquid varifocal lens controlled by electromagnetic device]. Patent RF, no. 2826524, 2024.
11. Voytov A.S., Egorenko M.P., Efremov V.S. *Dvukhdiapazonnyi zhidkostnyi varioob"ektiv na osnove effekta elektrosmachivaniya* [Dual-range liquid zoom lens based on electrowetting effect]. Patent RF, no. RU2802534C1, 2023.
12. Voytov A.S., Mikhailov I.O. *Perspektivy ispol'zovaniya zhidkikh linz v ob"ektivakh foto- i videotekhniki bespilotnykh letatel'nykh apparatov* [Prospects for the use of liquid lenses of photo-video technology of unmanned aerial vehicles]. *Interexpo Geo-Sibir' = Interexpo Geo-Siberia*, 2019, vol. 6, no. 1, pp. 134–140.
13. *Advantages and disadvantages of optical resin glasses*. 2017. Available at: <https://www.youjie-tools.com/news/advantages-and-disadvantages-of-optical-resin-6276620.html> (accessed 28.11.2025).
14. Rogachev N.M., Balandina B.Yu. *Aberratsii opticheskikh sistem* [Aberrations of optical systems]. Samara, SGAU Publ., 2012. 11 p.
15. GOST 9411–91. *Steklo opticheskoe tsvetnoe. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 9411–91. Coloured optical glass. Specifications]. Moscow, Standards Publ., 1991. 48 p.

Для цитирования:

Войтов А.С. Жидкостный ахроматический объектив-дублет с электромагнитным приводом // Системы анализа и обработки данных. – 2025. – № 4 (100). – С. 159–171. – DOI: 10.17212/2782-2001-2025-4-159-171.

For citation:

Voytov A.S. *Zhidkostnyi akhromaticheskii ob"ektiv-dublet s elektromagnitnym privodom* [Liquid achromatic doublet lens with an electromagnetic drive]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and data processing systems*, 2025, no. 4 (100), pp. 159–171. DOI: 10.17212/2782-2001-2025-4-159-171.