

# Жидкие линзы

Екатеринбург 2010

## АННОТАЦИЯ

В работе как теоретически, так и экспериментально исследованы разные способы управления кривизной поверхности жидкости (УКПЖ). На основе этого исследования разработаны, созданы и исследованы жидкие линзы (ЖЛ) с переменным фокусным расстоянием (ПФР).

Экспериментально опробованы следующие способы УКПЖ:

1. Гидравлический способ. Деформация упругой прозрачной плёнки (мембраны), с помощью контролируемого изменения количества жидкости в теле линзы;
2. Вращение жидкости. Используется явление поверхностного натяжения [2],[4]. Известно, что при этом поверхность жидкости принимает форму параболы.
3. Приложение внешнего электрического поля. Используется эффект поверхностного натяжения жидкости, а также электрические свойства воды.[3]

На основе сравнения способов, выбор пал на первый (Гидравлический способ), как наиболее оптимальный. Созданные в рамках этого способа ЖЛ исследованы с помощью установки: линза с ПФР, экран, осветительный прибор.

Измерены следующие характеристики ЖЛ: фокусное расстояние, поперечное увеличение, угловое увеличение. Например, экспериментальное значение фокусного расстояния удовлетворительно описывается известной [1] формулой толстой линзы. Аналогично и другие экспериментальные характеристики удовлетворительно описываются известными зависимостями [1].

Это успешное описание экспериментально полученных оптических характеристик ЖЛ известными законами геометрической оптики означает, что известные свойства обычных (твёрдых) линз и известные для них характеристики могут быть отнесены и к ЖЛ.

Представленная работа содержит оригинальные результаты, не повторяющие существующих способов и устройств (по результатам проведенного патентного поиска):

- Гидравлическая конструкция ЖЛ, для которой было исследовано большинство параметров и проверена применимость известных законов геометрической оптики[1];
- Приложение внешнего электрического поля для создания ЖЛ.

Жидкие линзы в отличие от обычных позволяют менять как знак фокусного расстояния, так и обладают значительной глубиной перестройки их фокусного расстояния, т.е. системы ЖЛ способны изменять оптические характеристики без изменения расстояния между линзами. Значит, использование ЖЛ в оптических системах существенно расширяет функциональные возможности этих систем в реальном времени, что немаловажно для адаптивной оптики.

Таким образом, ЖЛ обладают рядом достоинств: они легкоуправляемы, мобильны, быстроперенастраиваемы, просты и дешёвы в изготовлении. Появляется возможность использования одной управляемой линзы вместо нескольких обычных. ЖЛ не причинят вреда окружающей среде в случае повреждения или их утилизации. Есть возможность автоматизации процесса управления линзами. Жидкие линзы существенно расширяют возможности применения линз вообще.

В связи с успехами в области нанотехнологий и нанотехники представляется целесообразным миниатюризировать ЖЛ для создания интеллектуальных наносистем, т.е. интегрировать сенсорную, логически-аналитическую, двигательную и исполнительную функции в одном устройстве[6].

Данная работа – основа для дальнейшего развития ЖЛ, только уже в диапазоне нано-/микрометровых размеров.

Микро ЖЛ могут найти себе применение в различных оптических устройствах, как более компактные и простые объективы. Преимущества жидких линз в значительной степени справедливы и в микрометровой области размеров.

Например, использование ЖЛ в качестве объективов, вместо системы твёрдых линз в микрокамерах позволит уменьшить размеры последних. Что также должно способствовать снижению потребления энергии. Малое потребление энергии позволит, например, эффективно использовать преобразователи свободной энергии (акустической, электромагнитной) распределённой в пространстве. Малый размер микрокамер позволит использовать их в качестве фото и видео камер, в сверхминиатюрных (<10 см) беспилотных летательных аппаратах, и др.

Уменьшение до микронных размеров такой системы как жидкая линза позволит расширить применимость последних к всевозможным областям жизни, науки и техники.

## ВВЕДЕНИЕ

Сегодня вся деятельность человека немыслима без линз. Линзы исправляют дефекты зрения, применяются в зрительных приборах (бинокли, микроскопы, фото-видеокамеры, телескопы, лупа, очки и др.), осветительных устройствах, оптической аппаратуре спутников и т.д. Обычно линзы изготавливаются из стекла либо иного твёрдого оптически прозрачного материала, но данные конструкции не позволяют менять радиус кривизны преломляющей поверхности, то есть фокусное расстояние линзы. Устройства, где в качестве оптического тела линзы выступают оптически прозрачные жидкости, позволяют решить эту проблему. При этом форма преломляющей поверхности может плавно изменяться от вогнутой до выпуклой и обратно.

В настоящее время практически все технические оптические устройства используют системы твёрдых линз для достижения требуемых эффектов, но представляется более выгодным использование одной жидкой линзы (ЖЛ) с переменным фокусным расстоянием (ПФР) вместо нескольких обычных (твёрдых), что повысит эффективность и быстродействие устройства, а также сделает производство более экономичным.

В последние годы “жидкими линзами” заинтересовались несколько крупных компаний, занимающихся информационными технологиями и видеотехникой. В частности компания “Philips” анонсировала оптическую систему Fluid Focus, работающую за счет изменения электрического потенциала, приложенного к гидрофобному покрытию [5]. Размеры опытного образца Fluid Focus составили несколько миллиметров, перестройка фокусного расстояния производится в диапазоне от 5 сантиметров до бесконечности, причем скорость перестройки между крайними положениями менее 10 миллисекунд. Разработкой, подобных Fluid Focus, систем занимаются также компании “Bell Labs”, “Varioptic” и др.

Жидкие линзы имеют всевозможные области применения:

1. Создание очков с переменным фокусным расстоянием;
2. Фокусировка света в фонарях, прожекторах, автомобильных фарах;
3. Создание телескопов, биноклей, луп, оптических труб, микроскопов, фото-видеокамер;
4. Моделирование человеческого хрусталика и использование для создания роботов;
5. Создание искусственных “глаз”, способных видеть в различных спектрах;
6. Создание тренировочных очков для тренировки и коррективки зрения у детей и взрослых;
7. Использование ЖЛ для систем навигации (ракет, самолетов и др.)
8. На спутниках на околоземной или околопланетной орбите, т. е. в условиях пониженной гравитации.
9. Использование во всех областях, где работают обычные линзы и выполняются законы геометрической оптики.

В связи с успехами в области нанотехнологий и нанотехники представляется целесообразным миниатюризировать ЖЛ для создания интеллектуальных наносистем, т.е. интегрировать сенсорную, логически-аналитическую, двигательную и исполнительную функции в одном устройстве[6].

Микро жидкие линзы в свою очередь ещё больше расширят сферы возможного применения:

1. Миниатюрные фото-/видеокамеры различных цифровых устройств
2. Датчики, «глаза» сверхлегких беспилотных летательных аппаратов (< 10см)
3. Мобильные микроскопы
4. «Глаза» микро-/нанороботов и др.

**Целями** данной работы являются:

Разработка, создание и исследование жидких линз с ПФР.

Оценка возможности применения жидких линз в сверхминиатюрных устройствах.

Для достижения поставленных целей были решены следующие **задачи**:

- Исследование существующих способов управления кривизной поверхности жидкости (УКПЖ);
- Разработка оригинальных способов УКПЖ;
- Создание и опробирование жидких линз с ПФР на основе способов УКПЖ;
- Выбор оптимального способа УКПЖ;
- Экспериментальное и теоретическое исследование выбранного способа;
- Рассмотрение путей возможного применения ЖЛ.

Для удобства сравнение оригинальных результатов с известными в данном сообщении проводится совместно.

## ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ СПОСОБ

Растяжение упругой прозрачной пленки несжимаемой жидкостью, путём подачи (откачки) жидкости в (из) тела линзы. (Рис.1)

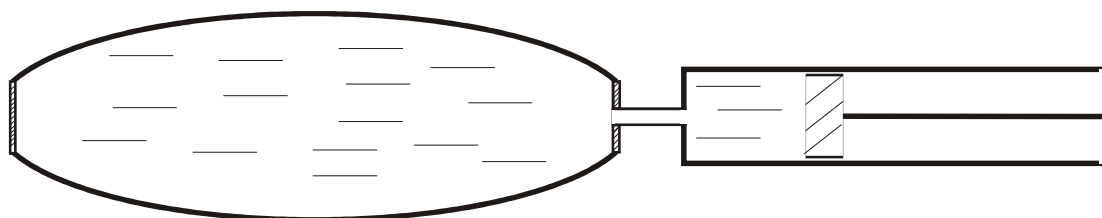


Рис.1

Преимуществом данной конструкции является то что, изготовив одну конструкцию линзы на её основе можно получить все типы линз (двояко-выпуклая, двояко-вогнутая, выпукло-вогнутая, плоско-выпуклая, плоско-вогнутая).

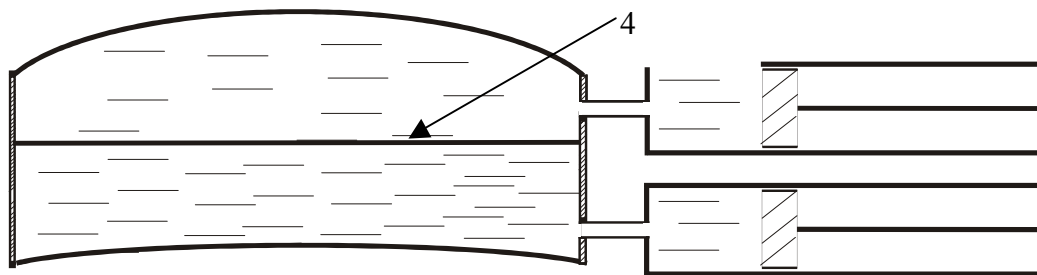


Рис.2

Если в конструкцию на (Рис. 1) поместить стекло (4) и управлять двумя поршнями, то мы получим ЖЛ, которая будет способна совмещать в себе все типы линз. (Рис.2)

Также важным достоинством данной конструкции является способность, эффективно функционировать (без потери оптических свойств) в любых положениях (относительно предмета).

Данный способ, как показано ниже, представляется оптимальным из предлагаемых, и будет подробно рассмотрен.

Был проведен патентный поиск, который показал отсутствие подобных конструкций жидких линз, значит, предложенный способ является оригинальным (Приложение).

Представляется целесообразным максимально возможно уменьшить размеры ЖЛ на основе данного способа, что отнесёт ЖЛ к классу микро-/ наноэлектромеханических систем (MEMS/NEMS).

Уменьшение жидкой линзы ограничено длиной волны фокусируемого света, что определяет размеры линзы (диаметр входного зрачка).

Управление линзой - регулировка объёма жидкости в теле линзы может осуществляться несколькими способами, в частности за счёт использования обратного пьезоэффекта.

### ВРАЩЕНИЕ ЖИДКОСТИ

Известно, что при вращении сосуда свободная поверхность жидкости принимает параболическую форму (Рис.3). Воспользовавшись данным эффектом можно реализовать три типа линз – двояковогнутую, выпукловогнутую и плосковогнутую. При этом в качестве одной преломляющей поверхности используется свободная поверхность жидкости (при изменении частоты вращения сосуда меняется радиус кривизны этой

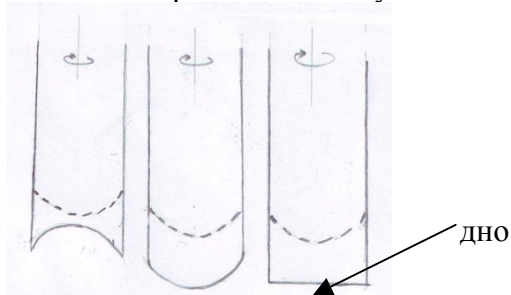


Рис.3

поверхности), второй поверхностью служит основание сосуда, форма этой поверхности задана и меняться не может.

Достоинством этого способа являются оптические свойства параболической поверхности. Данный способ был опробован экспериментально, было получено, что в процессе начала вращения есть “мёртвая зона”, т.е. не вся жидкость принимает форму параболы, а только её периферическая часть, а остальная находится в горизонтальном положении (см. Приложение (Рис.П. 1)). И только через некоторый промежуток времени (характерный для заданной скорости и конструкции) вся жидкость принимает форму параболы (см. Приложение (Рис.П. 2)).

К недостаткам данной конструкции относятся:

- необходимость поддержания постоянной скорости вращения;
- возможность использования только в горизонтальном положении в земных условиях;
- невозможность осуществления всех типов линз;
- присутствуют “мёртвые зоны”, где большая часть оптических свойств потеряна.

Миниатюризация ЖЛ данного способа не представляется целесообразной.

### ИЗМЕНЕНИЕ ДИАМЕТРА КАПЛИ С ПОМОЩЬЮ ДИАФРАГМЫ

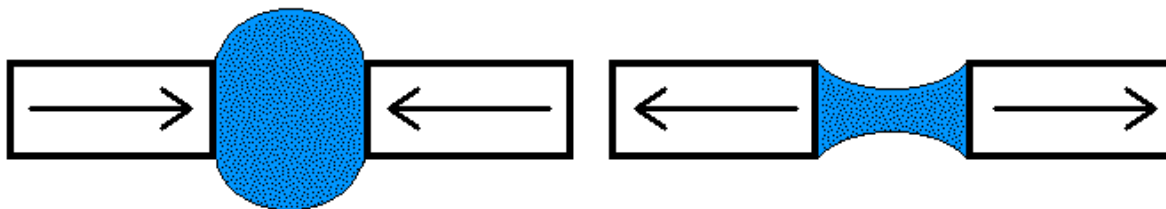


Рис.4

Если на диафрагму положить каплю какой-то прозрачной жидкости, то при изменении диаметра в ту или иную сторону можно наблюдать изменение кривизны и как следствие изменение фокусного расстояния. (Рис.4).

Управление радиусом кривизны жидкости на основе диафрагм возможно, однако есть некоторые ограничения:

- приходится использовать каплю только в горизонтальном положении;
- плавное изменение диаметра может стать непростой технической проблемой.

Уменьшение подобной конструкции возможно, но наличие свободной поверхности жидкости накладывает значительные ограничения на их применение.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Если к поверхности воды поднести заряженное тело, создающее неоднородное электрическое поле, то поверхность будет искривлена. Это связано с тем, что вода является полярным диэлектриком, то есть состоит из диполей, которые взаимодействует с внешним электрическим полем [3].

Для исследования этого явления была собрана экспериментальная установка (Рис.5а) состоящая из: усилителя высокого напряжения (3), электрода №1 - создающего поле (1), электрода №2 - в жидкости (2) и воды (4).

С использованием данной установки была проведена серия опытов, результаты которых приводятся ниже.

### Опыт 1

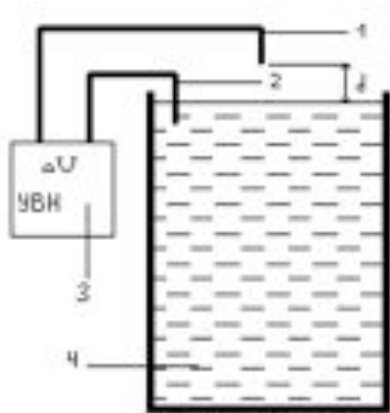


Рис.5а

Создаётся поле  $E=16,7\text{кВ/см}$  (при  $\Delta U=5\text{кВ}$  и расстоянием электрода №1 (с потенциалом  $+$ ) до воды  $d=3\text{мм}$ .) Электрод №2 опущен в воду. Образуется ямка глубиной  $h=2,5\text{мм}$  и диаметром  $D=8\text{мм}$ . См. Приложение (Рис.П. 3).

Считая, что ямка является шаровым сегментом (расчёт даёт  $R=4,86\text{мм}$ ) и по формуле тонкой линзы для фокусного расстояния получим, что  $f=-14,5\text{мм}$

Создаётся поле  $E=14,7\text{кВ/см}$  (при  $\Delta U=25\text{кВ}$  и расстоянием электрода №1 (с потенциалом  $+$ ) до воды  $d=17\text{мм}$ .) Электрод №2 опущен в воду. Образуется ямка глубиной  $h=8\text{мм}$  и диаметром  $D=15\text{мм}$ . См. Приложение (Рис.П. 4).

Аналогично считая, что ямка является шаровым сегментом, получим, что  $R=7,52\text{мм}$   $f=-22,45\text{мм}$

При изменении полярности электродов на поверхности воды образуются волны, нарушающие устойчивость.

### Опыт 2

Для данного опыта убираем из воды электрод №2. (Рис.5б)

При  $\Delta U=5\text{кВ}$  видимых эффектов не наблюдается.

При  $E=1666,7\text{кВ/см}$  (при  $\Delta U=25\text{кВ}$  и расстоянии электрода №1 до воды  $d=1,5\text{мм}$ ) независимо от полярности образуется холмик высотой  $h<1\text{мм}$  и в диаметре  $D<3\text{мм}$ . (См. Приложение Рис.П. 5. можно видеть по искажению поверхности воды).

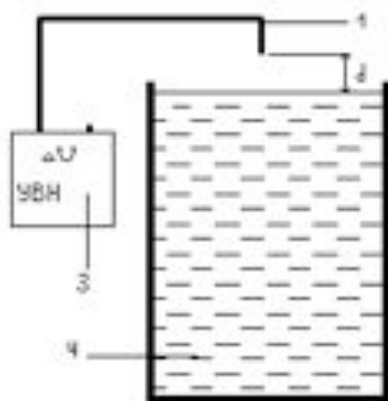


Рис.5б

Преимуществом данного способа является способность УКПЖ с помощью внешнего электрического поля, но есть ряд недостатков:

- необходимо поддерживать большую разность потенциалов (25кВ);
- необходимо сохранять горизонтальное положение.

Недостатки ограничивают использование подобных линз в миниатюрных, мало потребляющих оптических устройствах.

Данный способ создания ЖЛ является оригинальным по результатам патентного поиска (Приложение).

## ЭЛЕКТРОСМАЧИВАНИЕ

Как известно, свободная поверхность жидкости на поверхности твёрдого тела может искривляться. Это связано с эффектом смачивания. Если жидкость смачивает поверхность то капля, помещенная на поверхность будет по ней растекаться (Рис.П. 6 слева). Краевой угол  $\theta$  в этом случае будет острым. Если же жидкость не смачивает поверхность, то её поведение будет иным (Рис.П. 6 справа), краевой угол в этом случае будет тупым.

Величину коэффициента поверхностного натяжения жидкости, а следовательно, и степень изгиба (радиус кривизны) свободной поверхности жидкости можно изменять, добавляя в неё так называемые поверхностно-активные вещества (ПАВ), Кроме того, еще в конце XIX века было обнаружено [5], что величина разности потенциалов между проводящей поверхностью и каплей проводящей жидкости влияет на смачивание: краевой угол уменьшается пропорционально квадрату напряжения. Это так называемый эффект электросмачивания.

Поместим каплю воды на супергидрофобную поверхность (т.е. ту, которую вода совсем не смачивает)— она образует почти идеальный шарик. Затем приложим между поверхностью и каплей напряжение — капля как бы прижмется к поверхности, краевой угол уменьшится. Плавное увеличение и уменьшение напряжения, можно заставить каплю менять радиус кривизны. Кривизна поверхности капли меняется, следовательно, меняется и преломляющая способность линзы, ее фокусное расстояние. Нет никаких подвижных механических деталей. Работа жидкой линзы очень напоминает человеческий глаз, который фокусируется путем изменения кривизны хрусталика.

Опишем жидкую линзу на основе электросмачивания [5]. Устройство состоит из небольшой трубки с прозрачными торцами (рис.6),

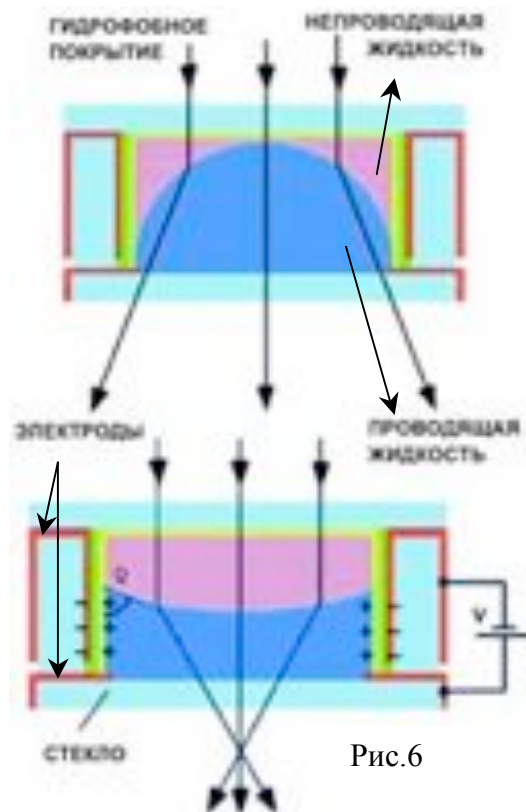


Рис.6

заполненной двумя несмешивающимися проводящей и непроводящей жидкостями с различными коэффициентами преломления. Одна представляет собой проводящий электричество водный раствор, а другая — масло, изолятор. Внутренняя поверхность трубки и один из торцов покрыты гидрофобным покрытием, в результате чего водный раствор, скапливающийся у противоположного торца, принимает “полусферическую” форму. Проводящая жидкость отталкивается от гидрофобного покрытия, собираясь в “полусферу”, так что непроводящая образует отрицательную (рассеивающую) линзу. Напряжение, поданное на окружающие ячейку электроды, изменяет кривизну ее поверхности и, следовательно, фокусное расстояние линзы — она может превратиться из рассеивающей в собирающую.

Данный способ, к сожалению, не удалось пока реализовать экспериментально, но, несомненно, он представляется перспективным как со стороны адаптивной оптики так и со стороны возможности уменьшения размеров.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИДКОЙ ЛИНЗЫ, РЕАЛИЗОВАННОЙ НА ОСНОВЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СПОСОБА.

Для исследования была создана двояко-выпуклая (двояко-вогнутая) ЖЛ (составные части: пленка, вода, проградуированный поршень, оболочка линзы) со следующими характеристиками:

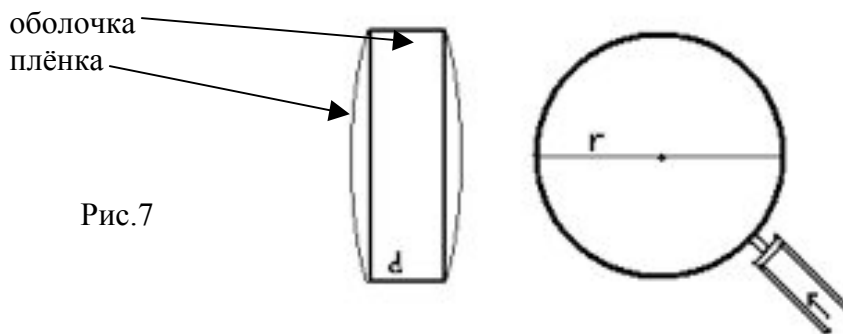


Рис.7

толщиной  $d=1,3\text{см}$ , радиусом основания  $r=2,9\text{см}$ , диапазоном изменения объёма линзы  $\Delta V=12,5\text{см}^3$ , показателем преломления  $n=1,335$  (рис.7)

Для экспериментального измерения фокусного расстояния собирающей линзы была собрана установка (экран, ЖЛ, диафрагма, для создания параксиальных лучей, источник света). Схема эксперимента представлена на рис.8.

При движении экрана вдоль главной оптической оси добивались самого чёткого изображения на экране, и тогда расстояние от линзы до изображения будет фокусным расстоянием.

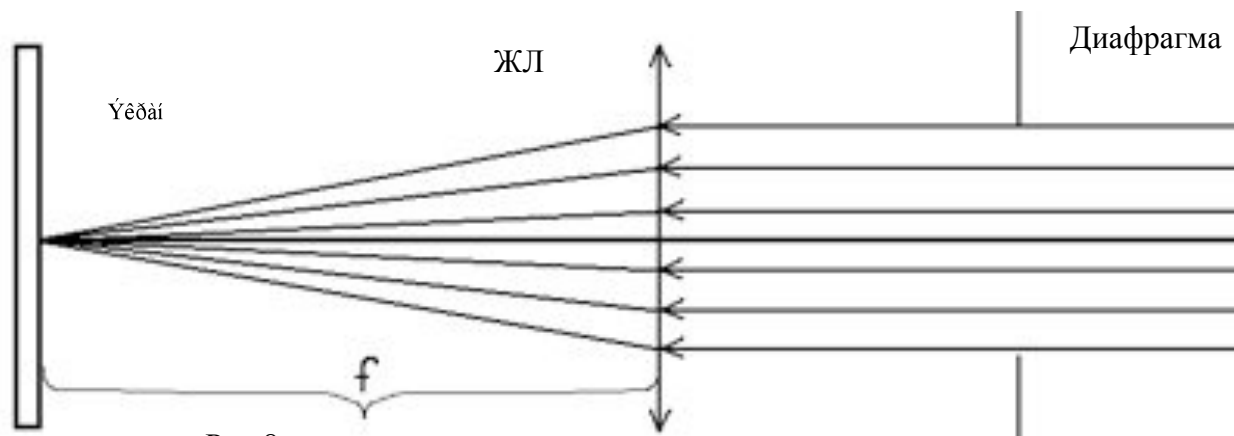
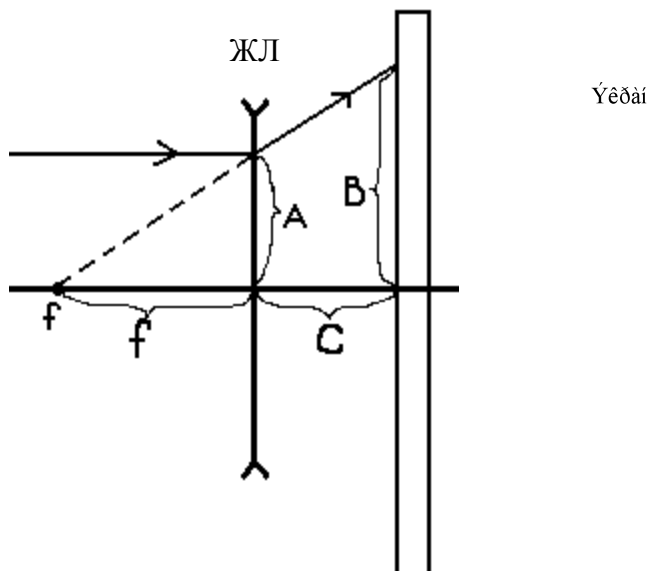


Рис.8

Экспериментальное измерение фокусного расстояния рассеивающей линзы проводилось по схеме (Рис.9). Исходя из подобия треугольников





$$f = \frac{A \cdot C}{B - A}$$

где А,В,С- измеряемые экспериментально расстояния,

f-фокусное расстояние (результаты содержатся в приложении см. Таблица)

Для теоретического описания фокусного расстояния воспользуемся формулой для фокусного расстояния толстой линзы [1] (когда нельзя пренебречь толщиной линзы в сравнении с радиусом основания  $r$ ):

$$f = -\frac{nR^2}{D}$$

где  $D = -(d \pm 2h)(n-1)^2$ ,  $R = \frac{r^2}{2h} + \frac{h}{2}$ .

Здесь

$n$ -показатель преломления воды;

R-радиус кривизны шарового сегмента (рис.10);

$d$ -толщина плоско-параллельного участка линзы;

$h$ -высота шарового сегмента (рис.10);

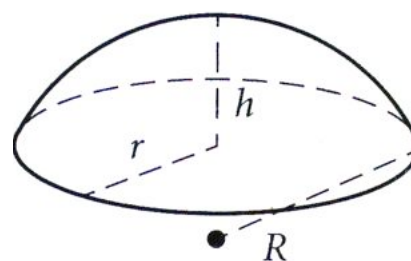
$r$ -радиус основания шарового сегмента (рис.10).

Значения  $f$  получаются при подстановке в вышеуказанную формулу экспериментально измеренных значений:  $r$ ,  $d$ ,  $h$ .

Теперь мы получили значения фокусного расстояния как теоретические, так и экспериментальные (помещённые в экспериментальную таблицу (Таблица)). Построен график зависимости фокусного расстояния от изменения объема линзы  $f(\Delta V)$ , где  $\Delta V = V - V_0$  ( $V$  – текущий объем воды в линзе;  $V_0$  – объем в плоско-параллельном состоянии линзы) и показан диапазон перестройки фокусного расстояния, см. (рис.11). Из-за сложных математических вычислений не удалось получить теоретическую аналитическую зависимость  $f(\Delta V)$ . Но, сравнение теоретических и экспериментальных значений для конкретных  $\Delta V_i$  – показывает, что характер зависимости совпадает (гиперболический). Полученные значения  $f$  (экспериментальные и теоретические) помещены в приложение (Таблица)

Недостатком данного графика является то, что не указаны погрешности, это сделано из-за недостаточного большого числа измерений.

Для конкретной линзы рабочий диапазон изменения фокусного расстояния от  $\pm 14$  см до  $\pm 60$  см, для того чтобы линза работала при  $f(14 - 14)$  см нужно использовать более прочную



и эластичную плёнку, значение фокусного расстояния  $> 60$  см и  $< -60$  см можно достигнуть используя более эластичную плёнку (без остаточных эффектов после растяжения).

На Графике воспроизведённые экспериментальные точки были измерены без достаточной выдержки (а время релаксации используемой плёнки было достаточно большим). Несовпадение экспериментальных значений  $f(\Delta V=5 \text{ см}^3 \text{ и } \Delta V=7,5 \text{ см}^3)$  с теоретическими связано с непоследовательностью измерений (т.е. точки  $\Delta V=5 \text{ см}^3$  и  $\Delta V=7,5 \text{ см}^3$  были выпущены из серии последовательных измерений) и также повлиял эффект связанный с релаксацией плёнки.



График

Также было проведено исследование возможности описания фокусного расстояния ЖЛ формулой тонкой линзы [1]:  $1/f=(n-1)(1/R_1-1/R_2)$ , где  $f$ -фокусное расстояние;  $n$ -показатель преломления;  $R_1, R_2$ -радиусы кривизны ограничивающих поверхностей. Полученные результаты даны в Приложении (Таблица). Ниже даны некоторые из них.

$\Delta V, \text{см}^3$	7,5	10	12,5
$f(\text{эксп.}), \text{см}$	30	19	17
$f(\text{иссл.}), \text{см}$	21	16	14

Видно, что формула удовлетворительно описывает фокусное расстояние жидкой линзы. При  $\Delta V=7,5 \text{ см}^3$  большое расхождение с экспериментом из-за остаточного эффекта (когда при растяжении плёнка не возвращается в исходное положение).

Эксперименты, изложенные выше, были проведены с одним типом плёнок, при этом качество работы линзы не зависит от ориентации относительно Земли (вертикального либо горизонтального).

Также были проведены опыты с другим типом пленок (более эластичными), при этом остаточной релаксации не наблюдалось, и потому значительно расширился диапазон перестройки фокусного расстояния, но появилась чувствительность к ориентации относительно Земли и внешним вибрациям. Представляется возможным использование ЖЛ с большим натяжением плёнки и меньшим радиусом основания, что позволит минимизировать внешние влияния.

## АБЕРРАЦИИ

Далее некоторые наблюдаемые aberrации [1]:

- Сферическая aberrация
- Дисторсия
- Хроматическая aberrация

**Сферическая aberrация** – свойство линзы, заключающееся в том, что лучи, проходящие на разном расстоянии от главной оптической оси, попадают в разные

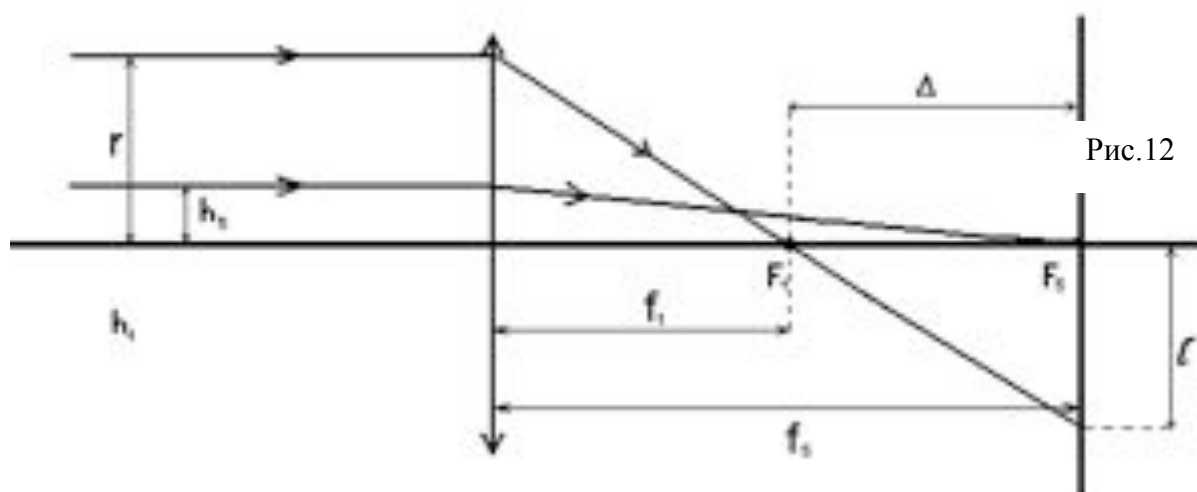


Рис.12

фокусы,

то есть лучи проходящие через центральную зону будут меньше преломляться, чем периферические лучи.

Различают:

- продольную сферическую aberrацию, которая представляет собой окружность в фокальной плоскости центр которой находится на главной оптической оси. Её характеристикой служит радиус aberrационной окружности  $l$ .

$l = Kb^3$ , где  $l$  – радиус aberrационной окружности  $K$  – постоянный коэффициент, зависящий от устройства оптической системы и от положения предметной плоскости;  $b$  – радиус входного зрачка.

- поперечную сферическую aberrацию. Характеристикой её является расстояние между параксиальным фокусом  $f_{\text{парак.}}$  и фокусом, получающимся при прохождении лучом периферической области линзы  $f_{\text{периф.}}$ .

$$\Delta = f_{\text{парак.}} - f_{\text{периф.}}$$

Измерим сферическую aberrацию для одной линзы, другие измеряются аналогично, для этого соберём установку: лазер, экран (горизонтальный), линейка (рис.12), где слева лазер, посылающий лучи параллельно главной оптической оси, который перемещается перпендикулярно главной оптической оси.

Из измерений подобных измерениям фокусного расстояния рассеивающей линзы получаем, что при  $\Delta V = 10 \text{ см}^3$  значения  $f(h)$  следующие, где  $h_1 = b = r$ ;  $f_5 \approx f_{\text{парак.}}$ ;  $f_1 = f_{\text{периф.}}$ :

$h_1 = 2,7 \text{ см}$	$h_2 = 2,2 \text{ см}$	$h_3 = 1,5 \text{ см}$	$h_4 = 0,7 \text{ см}$	$h_5 = 0,2 \text{ см.}$
$f_1 = 18,15 \text{ см}$	$f_2 = 18,9 \text{ см}$	$f_3 = 24,6 \text{ см}$	$f_4 = 26 \text{ см}$	$f_5 = 27,1 \text{ см}$

Исходя из подобия треугольников  $l = (r(f_5 - f_1))/f_1$ , подставив значения получим что поперечная сферическая aberrация равна  $l = 0,47$  см.

Это значит, что каждая точка будет изображаться на фокальной плоскости как кружок радиусом 0,47 см.

Продольная сферическая aberrация по её определению  $\Delta = f_5 - f_1$ , подставив значения получим  $\Delta = 8,95$  см.

**Дисторсия** – эффект, при котором при просмотре через линзу параллельные прямые становятся не параллельными, отклонение изображения точки от соответствующего параксиального фокуса [1] (рис.13).

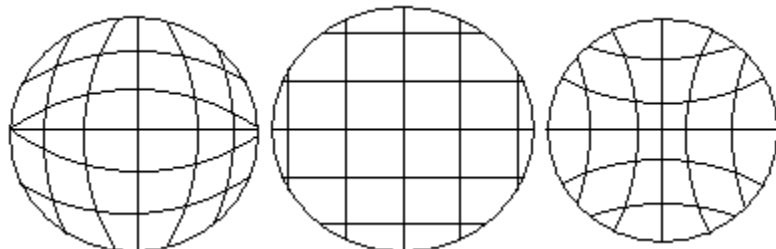


Рис.13

$k = Gh^3$ , где  $k$  – отклонение изображения от параксиального фокуса  $G$  – постоянный коэффициент, зависящий от устройства оптической системы и от положения предметной плоскости  $h$  – расстояние от главной оптической оси.

В работе количественная оценка дисторсии не проводилась, но дисторсия у исследуемых линз наблюдалась см. Приложение (Рис.П. 7).

**Хроматическая aberrация** – когда изображение в синих лучах (синем спектре) не совпадает с изображением в красных лучах (красном спектре), вследствие чего система даёт множество монохроматических изображений.[1]

Устраняется путём комбинации линз из различного вещества с разными оптическими свойствами.

У исследуемых линз наблюдалась хроматическая aberrация.

## Преимущества гидравлического способа

В результате проведенного исследования ЖЛ управляемой гидравлически можно отметить ряд её достоинств, в сравнении с другими ЖЛ. Чтобы не повторяться – перечень этих отличительных особенностей помещён в разделе “Выводы”.

## Вопросы миниатюризации

Миниатюризация ЖЛ будет осуществляться сборкой с помощью различных методов типа литографии

В вопросе применения нанотехнологий к жидким линзам можно выделить два направления:

- Максимально возможное, вместе с тем оптимальное уменьшение размеров ЖЛ. Если линза используется в качестве объектива к цифровой матрице, то все элементы камеры (жидкая линза, управляющие элементы, электрические контакты, ПЗС матрица, фильтры) должны располагаться на одном чипе, для повышения надёжности, быстродействия, уменьшения цены и размера.
- Применение наноматериалов для повышения характеристик ЖЛ. Например, для ЖЛ гидравлического способа необходима прозрачная, упругая, эластичная плёнка (мембрана), которая в микро ЖЛ должна будет иметь определённую толщину и структуру.

Уменьшение жидкой линзы ограничено длиной волны фокусируемого света, что определяет размеры линзы (диаметр входного зрачка).

Жидкие линзы по способу управления можно разделить на две группы:

- С механически подвижными частями; например, управление ЖЛ ГС - может осуществляться с помощью обратного пьезоэффекта. Уменьшение размеров подобных линз отнесёт их к классу MEMS.
- Без механически подвижных частей; например, линза на основе электросмачивания.

Использование ЖЛ в качестве объективов, вместо системы твёрдотельных линз в микрокамерах позволит уменьшить размеры последних. Что также должно способствовать снижению потребления энергии. Малое потребление энергии, например, позволит эффективно использовать преобразователи свободной энергии (акустической, электромагнитной) распределённой в пространстве.

Рассмотрим на примере микро ЖЛ ГС составляющие её элементы и возможные технологии создания.

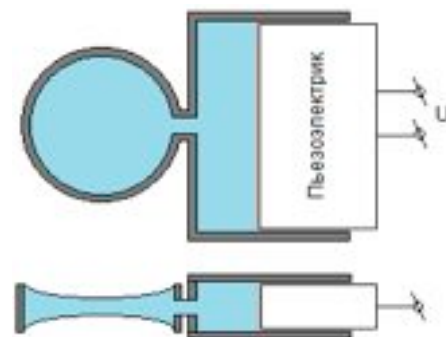
Жидкость – в самом простейшем случае можно использовать воду

Корпус линзы - можно создать с помощью традиционных технологий микроэлектроники, а именно: литография, осаждение плёнок, сухое и мокрое травление, диффузионная сварка при повышенных температурах, комбинация изотропного/анизотропного сухого травления и металлизации.[6]

Эластичная мембрана – должна представлять собой некую тонкую полимерную плёнку.

Управляющий элемент – пьезоэлектрический кристалл или более эффективная пьезо структура

Электрические контакты – создаются литографией



## Выводы

В результате проделанной работы были разработаны два оригинальных способа УКПЖ (см. Приложение). (Гидравлический способ, приложение внешнего электрического поля). Гидравлический способ был определён как более оптимальный и был исследован более подробно.

Результаты теоретического и экспериментального исследования ЖЛ с ПФР управляемых гидравлически позволили сделать следующие выводы:

- Удовлетворительное описание экспериментально полученных оптических характеристик ЖЛ известными формулами геометрической оптики позволяет предположить, что известные оптические свойства обычных (твёрдых) линз и используемые для их описания характеристики [1] могут быть отнесены и к ЖЛ.
- Основными достоинствами ЖЛ являются:
  - Большой диапазон перестройки фокусного расстояния;
  - Легкоуправляемость т.к. необходимо только движение поршня;
  - Мобильность т.е. возможно использование под любым углом;
  - Простота – состоят из оправы, воды, поршня, плёнки;
  - Дёшеvizна в изготовлении;
  - Возможность использования одной линзы вместо нескольких обычных (т.е. для изменения фокусного расстояния системы теперь не обязательно двигать линзы друг относительно друга, нужно лишь изменять параметры ЖЛ);
  - Моделирование человеческого хрусталика;
  - Не причинят вреда окружающей среде в случае повреждения или утилизации;

- Возможность автоматизации процесса управления линзами, т.е. управление линзами с помощью компьютера посредством сервоприводов, контроллеров и т.п.;
- Конструкция ЖЛ позволяет сохранять заданную кривизну поверхности, т.е. поршень после изменения объёма линзы “самопроизвольно” не смещается;
- Возможность создания всех типов линз;
- Работает с относительно большими диаметрами входных зрачков;
- ЖЛ также расширяют возможности адаптивной оптики, теперь для изменения параметров оптической системы не обязательно смещать линзы друг относительно друга, а появляется возможность менять характеристики линзы в реальном времени.

Однако использование вышеотмеченных достоинств, связанных с применением требует устранения (уменьшения) недостатков.

Создана основа для дальнейшего исследования ЖЛ. Проведённые исследования и полученные в них результаты служат предпосылкой для проведения более точных количественных оценок параметров ЖЛ: aberrаций, форм поверхностей и их стабильность, выбор типов используемых плёнок, жидкостей и др.

Жидкие линзы имеют уникальные возможности их применения (см. “Введение”) и свои преимущества (см. выше).

Жидкие линзы расширяют возможности применения линз вообще.

Данная работа – основа для дальнейшего развития ЖЛ, только уже в диапазоне нано-/микрометровых размеров.

Микро ЖЛ могут найти себе применение в различных оптических устройствах, как более компактные и простые объективы. Преимущества жидких линз в значительной степени справедливы и в микрометровой области размеров.

Уменьшение до микронных размеров такой системы как жидкая линза позволит расширить применимость последних к всевозможным областям жизни, науки и техники.



## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Фотографии и схемы



Рис.П. 1



Рис.П. 2



Рис.П. 3



Рис.П. 4

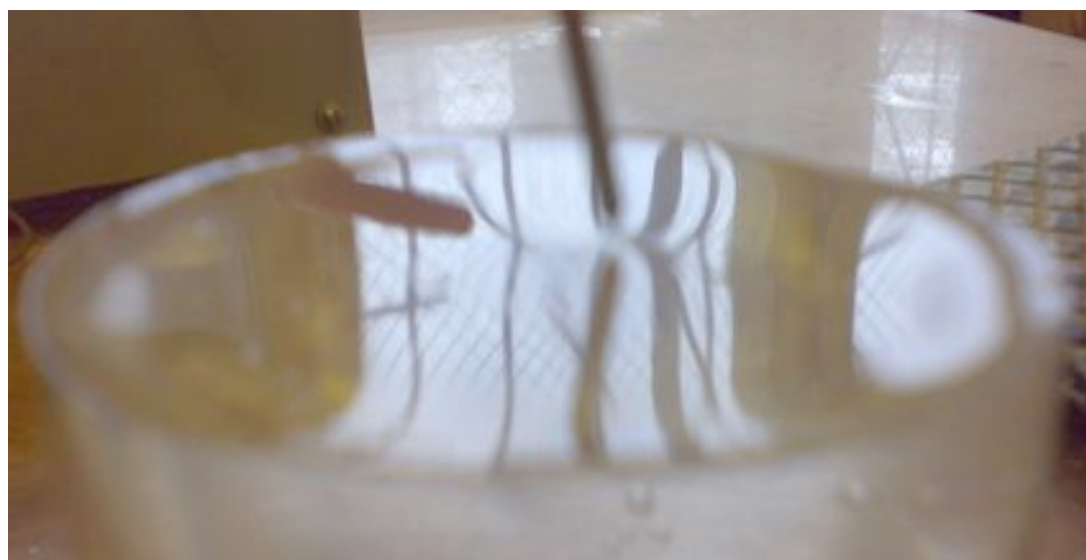
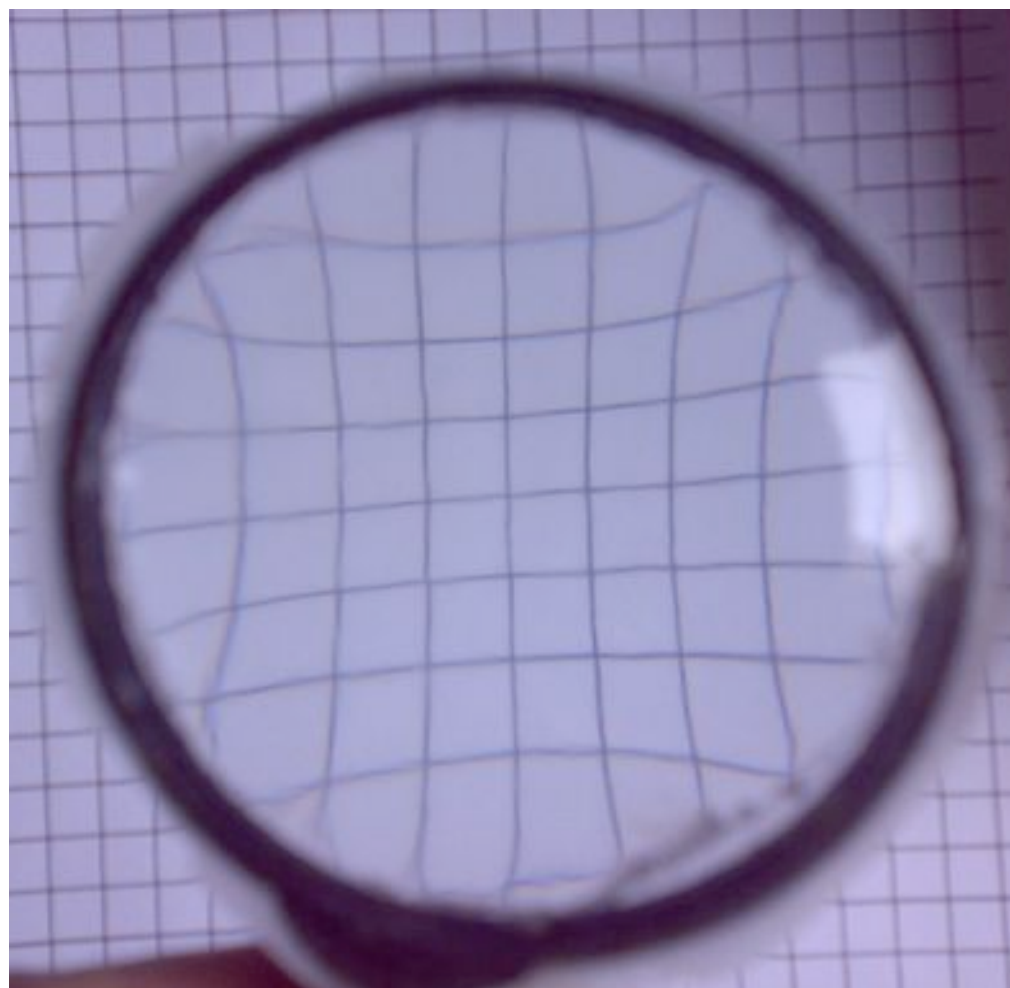


Рис.П. 5



Рис.П. 6





Таблица

Изменени е объема воды в линзе (мл)	$\Delta V$ , см <sup>3</sup>	12,5	10	7,5	5	2,5	0	-2,5	-5	-7,5	-10	-12,5
Объем линзы	$V_n$ , см <sup>3</sup>	149,8 2	147,32	144,82	142,32	139,82	137,32	134,82	132,32	129,82	127,32	124,82
Высота шарового сегмента	$h$ , см	0,475	0,4	0,3	0,2	0,1	0	0,1	0,15	0,225	0,3	0,355
Радиус кривизны поверхно- сти	$R$ , см	9,1	10,7	14,2	21,125	42,1	-	42,1	28,1	18,8	14,17	12
Фокусное расстояние (погр.)	$f$ , см	13,88	15,58	21	31,19	62,6	-	-62,6	-43,5	-27,8	-21	-17,82
Фокусное расстояние (хр.)	$f$ , см	17	19	30	42,5	63,75	-	-58	-45	-28	-20	-15,75
Фокусное расстояние (погр.) (Ф. ток. л.)	$f$ , см	13,58	15,97	21,19	31,53	62,84	-	-62,84	-41,94	-26,1	-21,15	-17,9
Оптическая сила линзы	$F$ , дптр	5,9	5,2	3,3	2,4	1,6	0	-1,6	-2,2	-3,6	-5	-6,4

## ПАТЕНТНЫЙ ПОИСК

По Международному Классификатору Изобретений (МКИ) были отобраны разделы с содержанием похожим на тему представленной работы.

Было проведено ознакомление с описанием патентов по данным “Роспатент” до 2007 г по разделам и найдены следующие публикации:

- G-физика:
  - G02B1/12. № публикации:
    - 1659946 – Оптическая линза с ПФР
    - 489058 – Оптическая линза с ПФР
    - 13769 – Объектив с жидкой преломляющей средой
    - 1296977 – Фокусирующий оптический элемент с регулируемым фокусным расстоянием
    - 2234722 – Линзы с изменяемым фокусным расстоянием, используемые для очков
    - 2282221 – Оптический элемент
  - G02B1/06. № публикации:
    - 440630 – Электроуправляемая асферическая линза
    - 2115144 – Способы получения жидких оптических поверхностей
  - G02B3/14. № публикации:
    - 505980 – Сферическая линза с ПФР
    - 1453358 – Линза с ПФР
    - 2093867 – Объектив с ПФР
- H-электричество:
  - H01J3/14. № публикации:
    - 3459929 – Электростатическая иммерсионная линза
    - 286094 – Электростатическая линза
  - H01J293/62. № публикации:
    - 408393 – Электростатическая фокусирующая система

Не найдено описания патента использующего ГС для создания ЖЛ.

Не обнаружено описание патентов, использующих способ приложения внешнего электрического поля для создания ЖЛ, предложенного в работе.

Принцип вращения жидкости для получения параболической формы найден в публикации №1296977 (от 1984 года).

## Список использованной литературы:

1. Д. В. Сивухин, Общий курс физики. Том 4 Оптика. Москва Физматлит . 2005 г.
2. Д. В. Сивухин, Общий курс физики. Том 2 Термодинамика и молекулярная физика. Москва “Наука”. 1979 г.
3. Д. В. Сивухин, Общий курс физики. Том 3 Электричество. Москва Физматлит . 2005 г.
4. Х. Кухлинг, Справочник по физике. Москва “Мир”. 1982 г.
5. Интернет. <http://nauka.relis.ru/05/0502/05502032.htm>.
6. Ю. И. Головин, Введение в нанотехнику, изд. «Машиностроение», 2007.

## Оглавление

АННОТАЦИЯ .....	1
ВВЕДЕНИЕ .....	3
ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ СПОСОБ.....	4
ВРАЩЕНИЕ ЖИДКОСТИ .....	5
ИЗМЕНЕНИЕ ДИАМЕТРА КАПЛИ С ПОМОЩЬЮ ДИАФРАГМЫ .....	5
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ .....	6
Опыт 1 .....	6
Опыт 2 .....	6
ЭЛЕКТРОСМАЧИВАНИЕ .....	7
ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИДКОЙ ЛИНЗЫ, РЕАЛИЗОВАННОЙ НА ОСНОВЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СПОСОБА.....	8
АБЕРРАЦИИ .....	11
Преимущества гидравлического способа .....	12
Вопросы миниатюризации .....	12
Выводы .....	13
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	15
Фотографии и схемы .....	15
Таблица .....	17
ПАТЕНТНЫЙ ПОИСК .....	18
Список использованной литературы:.....	18