На втором этапе выполнения проекта синтезированы новые образцы магнитоактивного эластомера для получения на их основе внутренних магнитных пломб разрабатываемого фиксатора. В ходе синтеза композита проведена модификация поверхности микрочастиц железа, синтезированы силиконовые матрицы «медицинской чистоты». Получены образцы МАЭ разного состава на основе модифицированных частиц железа с использованием силиконового полимера «медицинской чистоты», концентрация магнитного наполнителя варьировалась от 52 до 80 масс %. Получены пленки из МАЭ разного состава с толщиной 0.2-0.5 мм для экспериментальных медицинских исследований и аналогичные по составу пленки и диски с толщиной 0.2-0.9 мм для прочностных и реологических измерений.

Изучена структуры поверхности МАЭ и измерены краевые углы смачивания образцов МАЭ в зависимости от состава и метода синтеза, показано, что структура поверхности однородна и что поверхность обладает гидрофобными свойствами, которые слабо зависят от состава материала и величины внешнего магнитного поля до 300 мТл.

Изучены вязкоупругие свойства МАЭ в зависимости от состава и величины внешнего магнитного поля. Измерены частотные зависимости компонент динамического модуля упругости всех полученных образцов МАЭ для выбора параметров реологической модели, описывающей вязкоупругое поведение МАЭ в магнитных полях. Проведенное тестирование образцов на прочность продемонстрировало высокие значения деформации и напряжения при разрыве, намного превышающие ожидаемые при использовании пломб для лечения отслоения сетчатки.

Измерения магнитных свойств МАЭ показали, что восприимчивость в нулевом поле и намагниченность в максимальном поле монотонно увеличиваются с ростом концентрации частиц железа. Для всех образцов были определены параметры, используемые при задании магнитных свойств материала в моделировании.

Были получены внешние магнитные пломбы для магнитного фиксатора глаза разной конфигурации. Для их изготовления использовались постоянные неодимовые магниты разного размера и формы, которые помещались в ленту из силикона. В частности, были получены магнитные пломбы на основе дискообразных, кольцевых и прямоугольно-параллелепипедных магнитов. Магниты в пломбах располагались в ряд, причем, направления магнитных моментов магнитов в пломбах либо совпадали, либо чередовались. Также были созданы двухрядные пломбы с разным расположением магнитов в рядах.  Кроме того, впервые получены магнитные пломбы из магнито-полимерного композита, содержащего магнитожесткий наполнитель. В качестве наполнителя в этом случае использовали частицы сплава неодим-железо-бор, в качестве матрицы – силиконовый эластомер. Полученные магнито-полимерные пломбы намагничивали в магнитном поле 16 кЭ.

Была проведена модернизация созданной на первом этапе экспериментальной установки для измерения сил взаимодействия образцов МАЭ и систем магнитов с целью повышения точности измерений. Было получено, что абсолютное значение магнитного давления в магнитном фиксаторе увеличивается с ростом концентрации магнитного наполнителя в МАЭ. Его зависимость от расстояния между поверхностями внутренней и внешней пломб описывается гиперболической функцией. Измерения сил взаимодействия в магнитном фиксаторе с цилиндрическими и кольцевыми магнитами одинаковых размеров продемонстрировали, что отверстие в магните, несмотря на увеличение неоднородности, значительно ослабляет магнитное поле, что приводит к ослаблению взаимодействия приблизительно в 3 раза. Также были исследованы силы взаимодействия образцов МАЭ разного состава и размера с системами двухрядных пломб однонаправленных и чередующихся магнитов. Обнаружено, что давление в случае чередующихся магнитов имеет большее значение из-за большей неоднородности магнитного поля. Измерения сил взаимодействия в плоской и криволинейной конфигурациях показали, что расхождение значений сил для плоской и криволинейной поверхностей невелико и составляет порядка 25% при минимальном расстоянии 0.5 мм.

Также было получено, что давление, достигаемое при использовании внешней пломбы на основе сплава неодим-железо-бор, в несколько раз ниже, чем для пломб, изготовленных из промышленных магнитов.

Предложены различные теоретические подходы как для описания вязкоупругих свойств МАЭ, так и для расчета магнитных полей и давлений, возникающих в системах МАЭ-магнит. В частности, выявлен класс дробных реологических моделей, приводящих к минимальным ошибкам при описании с их помощью вязкоупругого отклика материала для широкого диапазона магнитных полей. На основе разработанной на первом этапе выполнения проекта программы моделирования рассчитаны конфигурации магнитных полей для плоской и криволинейной геометрии фиксатора. Показано, что различие в характеристиках магнитных полей для плоского случая и случая с кривизной геометрии, соответствующей кривизне реального человеческого глаза, невелико. Была дана оценка ошибки использования плоской геометрии вместо геометрии, соответствующей человеческому глазу. Показана возможность использования плоской геометрии для многих расчётов.

Был проведён анализ влияния ошибок в геометрических параметрах системы магнитов на получаемые результаты. Рассмотрены ошибки при смещениях и вращениях одного из магнитов системы, полностью случайные ошибки и скоррелированные ошибки для всей системы. Показано, ошибки какого рода вносят наибольшие возмущения.

Также в рамках рассмотрения задачи о взаимодействии образца МАЭ с системой постоянных магнитов были рассчитаны тангенциальные компоненты действующих сил при различных положениях и размерах образцов. Найдено, что размеры образцов, при которых достигается наибольшая устойчивость в тангенциальных направлениях, должны в длину составлять один-два периода магнитной системы.

Разработан модельный глаз для оценки величины тангенциального смещения внутренних пломб при их наложении на сетчатку. Последующие исследования на донорских глазах показали хорошую воспроизводимость результатов, полученных на модельном глазу.

В ходе экспериментальных исследований на изолированных донорских (трупных) глазных яблоках изучены условия для наиболее точного расположения внутренних пломб на внутренней поверхности глаза для различных пар наружных и внутренних пломб, включая наружные пломбы, содержащие дисковидные и прямоугольно параллелепипедные магниты (однонаправленные и с чередующимся направлением магнитного поля), с расположением дисковидных магнитов в 1 ряд и в 2 ряда параллельно и в шахматном порядке, наружные пломбы с экранированием слоем магнитоактивного эластомера и наружные пломбы из эластомера с магнитожестким наполнителем в паре с внутренними пломбами толщиной 0,2мм и 0,4мм различной длины, в том числе длиной в 1 и 2 периода размещения магнитов во внешних пломбах, а также пломбами-лентами длиной, равной всей длине наружной магнитной пломбы.

Найдено решение проблемы тангенциального смещения внутренних пломб. Согласно результатам экспериментов, условием для наиболее точного позиционирования внутренних магнитных пломб в магнитном поле, создаваемом наружными магнитными пломбами является использование внутренних пломб длиной, кратной периоду расположения постоянных магнитов в наружной пломбе.

Установлено, что наружные пломбы с экранированием слоем магнитоактивного эластомера дают меньшее по величине тангенциальное смещение чем те же пломбы без экранирования, однако их магнитное поле слабее, и при их использовании давление на сетчатку со стороны внутренних пломб было недостаточным.

Выявлено, что внутренние пломбы с прямоугольным краем занимают более стабильное положение в магнитном поле наружных пломб по сравнению с внутренними пломбами выпукло-вогнутой формы, так как "хвостики" выпукло-вогнутых пломб часто заворачивались под пломбу. Таким образом на будущее определена предпочтительная форма внутренних пломб: в виде прямоугольников со скругленными краями.

По результатам проведенной работы подготовлены и опубликованы три статьи в высокорейтинговых журналах, подготовлено и сделано 9 докладов (пленарные, приглашенные и постерные) на семи всероссийских и международных конференциях. По трем подготовленным и поданным патентным заявкам получены патенты. Достижения, полученные в рамках проекта, освещались различными СМИ, в частности, Российской газетой (https://rg.ru/2017/11/14/uchenye-iz-mgu-nashli-novyj-sposob-lecheniia-otsloeniia-setchatki.html) и газета.ru (https://www.gazeta.ru/science/news/2017/10/30/n\_10754408.shtml). Кроме того, была подготовлена передача, показанная каналом ТВЦентр (http://www.tvc.ru/news/show/id/128716/).