

ГИДРОСТАТИКА СИЛИКОНОВОЙ ТАМПОНАДЫ ВИТРЕАЛЬНОЙ ПОЛОСТИ В АСПЕКТЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ФИКСАЦИИ СЕТЧАТКИ

DOI: 10.17691/stm2018.10.4.02

УДК 617.735–089.881

Поступила 24.03.2018 г.



Е.Г. Казими́рова, аспирант¹; физик кафедры физики полимеров и кристаллов физического факультета²;

В.В. Ши́ряев, к.ф.-м.н., преподаватель кафедры общей физики³;

П.В. Лы́скин, к.м.н., врач-офтальмохирург отдела витреоретинальной патологии и диабета глаза¹;

Г.В. Степа́нов, начальник лаборатории магнитных пигментов и композитов⁴;

младший научный сотрудник кафедры физики полимеров и кристаллов физического факультета²;

Е.Ю. Крама́ренко, д.ф.-м.н., профессор кафедры физики полимеров и кристаллов физического факультета²

¹МНТК «Микрохирургия глаза» им. академика С.Н. Федорова Министерства здравоохранения РФ, Бескудниковский бульвар, 59а, Москва, 127486;

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1/2, Москва, 119991;

³Московский физико-технический институт (государственный университет), Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московская обл., 141701;

⁴Государственный научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений, шоссе Энтузиастов, 38, Москва, 111123

В хирургическом лечении отслоек сетчатки широко используется метод тампонады витреальной полости силиконовым маслом. Проведенный авторами анализ распределения физических сил, действующих на сетчатку в различных отделах витреальной полости, обнаружил зоны недостаточности тампонирующего эффекта, что позволяет говорить о перспективности модернизации хирургического вмешательства, направленного на создание дополнительной силы, прижимающей сетчатку к подлежащим тканям в тех зонах, где эффект силикона недостаточен.

Цель исследования — разработать технологию, позволяющую удерживать сетчатку в нужном анатомическом положении в тех областях, где тампонирующий эффект силикона неполноценен, которая может применяться в осложненных случаях отслойки сетчатки с гигантскими разрывами, ретинодиализом или трудноудаляемыми эпиретинальными мембранами в случае пролиферативной витреоретинопатии.

Материалы и методы. Предлагаемое устройство — двойной магнитоактивный фиксатор сетчатки — способно осуществлять прижатие сетчатки за счет взаимного притяжения подшиваемой к склере наружной магнитной пломбы и внутренних магнитных пломб из магнитоактивного эластомера, накладываемых на сетчатку в проекции наружной магнитной пломбы. Проведена серия экспериментов по отработке технологии на изолированных донорских глазных яблоках: выполняли эписклеральное пломбирование различными наружными магнитными пломбами, а для дополнительной механической фиксации сетчатки со стороны витреальной полости после субтотальной витрэктомии вводили экспериментальные образцы магнитоактивного эластомера различной формы и толщины.

Результаты. В экспериментах наружные (эписклеральные) магнитные пломбы по своим упруго-эластичным свойствам не отличались от обычных. Внутренние магнитные пломбы хорошо ложились на сетчатку, ровно, плотно и качественно удерживали ее, придавливая к подлежащим оболочкам. Были апробированы различные размеры и формы пломб, выбраны наиболее удобные для интравитреальных манипуляций. Внутренние пломбы легко подвергались удалению посредством витреотома 25G.

Заключение. Разработанная технология позволяет эффективно удерживать сетчатку силами магнитного взаимодействия.

Ключевые слова: силиконовое масло; тампонада витреальной полости; осложненная отслойка сетчатки; ретинодиализ; гигантские разрывы сетчатки; механическая фиксация сетчатки; магнитные пломбы; магнитное склеральное пломбирование.

Как цитировать: Kazimirova E.G., Shiryayev V.V., Lyskin P.V., Stepanov G.V., Kramarenko E.Yu. Silicone oil tamponade hydrostatics and technology for additional mechanical support of retina. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2018; 10(4): 15–25, <https://doi.org/10.17691/stm2018.10.4.02>

Для контактов: Крамаренко Елена Юльевна, e-mail: kram@polly.phys.msu.ru

Silicone Oil Tamponade Hydrostatics and Technology for Additional Mechanical Support of Retina

E.G. Kazimirova, PhD Student¹; Physicist, Department of Physics of Polymers and Crystals, Faculty of Physics²;
V.V. Shiryaev, PhD, Lecturer, Department of General Physics³;
P.V. Lyskin, MD, PhD, Ophthalmic Surgeon, Department of Vitreoretinal Pathology and Eye Diabetes¹;
G.V. Stepanov, Head of the Laboratory of Magnetic Pigments and Composites⁴; Junior Researcher, Department of Physics of Polymers and Crystals, Faculty of Physics²;
E.Yu. Kramarenko, DSc, Professor, Department of Physics of Polymers and Crystals, Faculty of Physics²

¹S. Fyodorov Eye Microsurgery Federal State Institution, 59a Beskudnikovsky Blvd, Moscow, 127486, Russia;

²Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russia;

³Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia;

⁴State Scientific Research Institute of Chemistry and Technology of Organoelement Compounds, 38 Entuziastov Shosse, Moscow, 111123, Russia

Silicone oil tamponade is widely used in the surgical treatment of retinal detachments. The article provides analysis of mechanical forces exerted to the retina in various parts of the vitreous cavity. There are areas of tamponade effect insufficiency, in which it may be beneficial to create additional means which would support the retina keeping it attached to the pigment epithelium.

The aim of the study was to develop a new technique desired to keep the retina attached in the areas where retina lacks effective tamponade effect of silicone oil. The technology is desired to be implemented in challenging cases of retinal detachments caused by giant retinal breaks, retinodialysis, or in patients with hard-to-remove epiretinal membranes in proliferative vitreoretinopathy.

Materials and Methods. The proposed technique — magnetic scleral buckling — is able to exert pressure to the retina by the means of mutual magnetic attraction of the magnetic scleral buckle (outer buckle) sutured to the retina and endovitreous magnetic buckles (inner buckles) made of magnetoactive elastomer and placed onto the retina in the projection of the outer magnetic buckle. A series of *ex vivo* experiments was performed to elaborate the technique using isolated cadaver donor eyes: we performed magnetic scleral buckling and then subtotal vitrectomy with iatrogenic detaching of retina followed by implantation of endovitreous magnetic buckles (inner buckles) made of magnetoactive elastomers to provide additional mechanical support for the retina.

Results. Elastic properties of the magnetic scleral buckles didn't differ from those of common scleral buckles. Endovitreous magnetic buckles fitted well onto the retina, smoothly, tightly and effectively held it pressing against the pigment epithelium. We tried buckles of various sizes and shapes and chose the best fitted for endovitreous manipulations. Endovitreous buckles securely supported the retina and could be easily removed with 25G vitreotome.

Conclusion. The developed technique of magnetic scleral buckling allowed to keep retina securely reattached with magnetic forces as was shown during *ex vivo* experiments. Further *in vivo* studies of the technique are required.

Key words: silicone oil; vitreous tamponade; complicated retinal detachment; retinodialysis; giant retinal breaks; mechanical support of retina; magnetic buckles; magnetic scleral buckling; magnetoactive elastomers.

Введение

Физические принципы силиконовой тампонады. В хирургическом лечении отслоек сетчатки широко используется метод тампонады витреальной полости силиконовым маслом. Особенность силиконовой тампонады состоит в том, что на практике невозможно добиться абсолютно полного заполнения витреальной полости силиконом. После произведенной тампонады в полости остаются площади сетчатки, в большей или меньшей степени лишенные тампонирующего эффекта: «легкий» силикон всплывает кверху, оставляя часть сетчатки в нижних отделах без тампонирующего эффекта, а при использовании «тяжелого» силикона без

эффекта тампонады остается сетчатка в верхних отделах. При этом чем дальше от сетчатки находится уровень мениска — границы раздела силикона и внутриглазной жидкости (ВГЖ), — тем больше площадь, лишенная эффекта тампонады (рис. 1, 2). При прочих равных условиях оставление нетампонируемых участков витреальной полости несет в себе меньшую опасность, чем избыточная тампонада, так как переполнение витреальной полости силиконом приводит к неконтролируемому повышению внутриглазного давления.

Идеальным тампонирующим эффектом можно считать только при 100% заполнении витреальной полости силиконом, чего в реальности достичь практически невозможно. В любом случае будет оставаться область

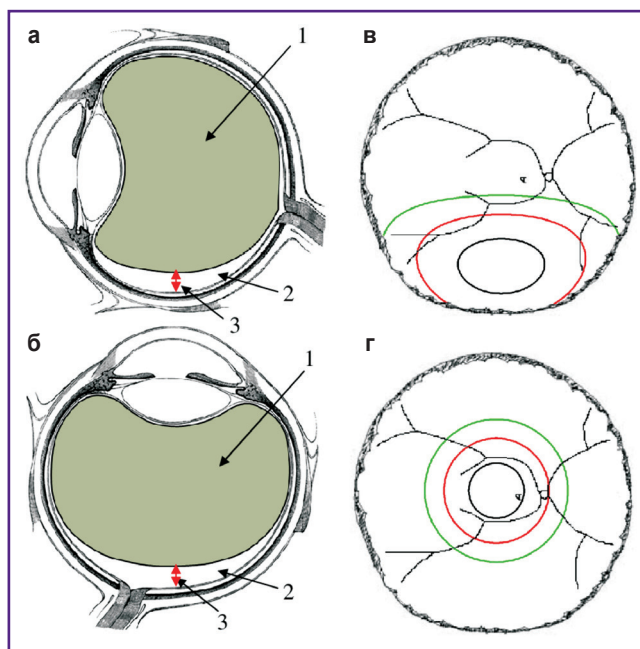


Рис. 1. Заполнение витреальной полости «легким» силиконовым маслом:

а — в положении стоя; б — в положении лежа на спине; 1 — силиконовое масло; 2 — остаточная нетампонированная область витреальной полости; 3 — высота отстояния мениска; в и г — соответствующая площадь сетчатки, лишенная эффекта тампонады: *черный цвет* — при высоте отстояния мениска силикона 1 мм, *красный цвет* — при высоте 2 мм и *зеленый цвет* — при высоте 3 мм

без тампонирующего эффекта большей или меньшей степени протяженности.

Примечателен эксперимент I.M. Fawcett с соавт. по заполнению модельной витреальной полости силиконом, который показал, что 100% заполнение невозможно в силу физических свойств силикона [1].

Установлено [2], что даже в случае незначительной неполноты заполнения витреальной полости силиконом большая площадь сетчатки остается без тампонирующего эффекта (см. рис. 1, 2). Так, при отстоянии мениска на 2 мм площадь сетчатки, лишенная тампонирующего эффекта, составляет $3,8 \text{ см}^2$, а при отстоянии на 3 мм — уже $6,5 \text{ см}^2$. Таким образом, даже в случаях, когда витреальная полость может казаться заполненной силиконом практически полностью, в силу того, что глаз имеет шарообразную форму, даже небольшая неполнота заполнения приводит к образованию значительной площади сетчатки, лишенной эффекта тампонады.

Тампонада силиконом в какой-то мере есть определенный компромисс с точки зрения достижения необходимого тампонирующего эффекта во всех отделах витреальной полости и дает хорошие результаты в случаях «изолированного» верхнего

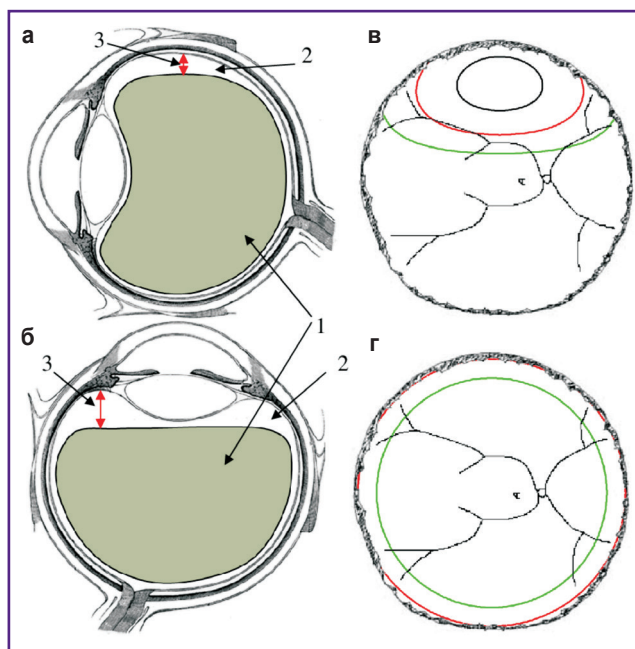


Рис. 2. Заполнение витреальной полости «тяжелым» силиконовым маслом:

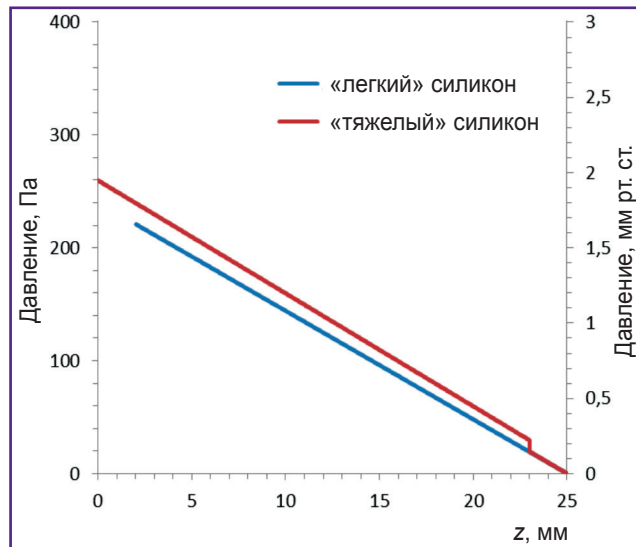
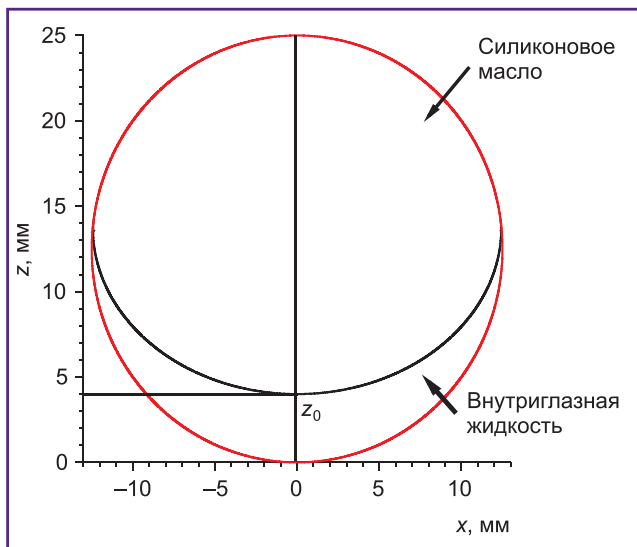
а — в положении стоя; б — в положении лежа на спине; 1 — силиконовое масло; 2 — остаточная нетампонированная область витреальной полости; 3 — высота отстояния мениска силикона; в и г — соответствующая площадь сетчатки, лишенная эффекта тампонады: *черный цвет* — при высоте отстояния мениска силикона 1 мм, *красный цвет* — при высоте 2 мм и *зеленый цвет* — при высоте 3 мм

либо нижнего квадрантов, требующих тампонады. Сочетание одновременно верхних и нижних разрывов исключает полноценное тампонирование.

Для оценки возможностей достижения полноценности тампонирующего эффекта во всех отделах витреальной полости целесообразно рассмотреть физические силы, действующие на сетчатку при тампонаде силиконовым маслом. В литературе не представлено описание тампонады витреальной полости силиконом с точки зрения понимания физических процессов. Однако этот вопрос заслуживает более подробного освещения, так как силиконовая тампонада остается часто используемым методом и недостаточное понимание его физических законов не позволяет достичь максимально рационального применения этого метода в клинической практике.

Рассмотрим тампонируемую витреальную полость и рассчитаем силу давления, прижимающего сетчатку к пигментному эпителию и поддерживающего ее в нормальном анатомическом положении (рис. 3, ось z направим вверх, приняв дно глаза за нуль).

Давление, которое действует на сетчатку на высоте z, в случае использования «легкого» силиконового



масла равно (давление в верхней части глаза примем за нуль)

$$P = \rho_{CM} g (D - z),$$

где ρ_{CM} — плотность силиконового масла, g — ускорение свободного падения, а D — диаметр глаза.

В случае «тяжелого» силикона ситуация несколько сложнее. Давление в ВГЖ выше мениска будет равно

$$P = \rho_{ВГЖ} g (D - z),$$

где $\rho_{ВГЖ}$ — плотность внутриглазной жидкости. При переходе из ВГЖ в тампонирующее вещество давление испытывает связанный с поверхностным натяжением скачок:

$$\Delta P = 2 \frac{\sigma_{CM-ВГЖ}}{R_0},$$

где $\sigma_{CM-ВГЖ}$ — коэффициент поверхностного натяжения на границе силиконового масла с ВГЖ, а R_0 — средний радиус кривизны мениска в его верхушке ($x=0$).

Затем вновь наблюдается линейный рост давления пропорционально плотности силиконового масла:

$$P = \begin{cases} \rho_{ВГЖ} g (D - z) & \text{при } z > z_0; \\ \rho_{ВГЖ} g (D - z_0) + 2 \frac{\sigma_{CM-ВГЖ}}{R_0} - \rho_{CM} g (z - z_0) & \text{при } z < z_0, \end{cases}$$

где z_0 — координата мениска.

График зависимости давления от высоты z для обоих только что рассмотренных случаев показан на рис. 4. Величина R_0 была рассчитана с помощью гидростатической модели, аналогичной рассмотренной в работе [3].

Представим распределение давления, прижимающего сетчатку, в более наглядном виде для случаев тампонады «легким» и «тяжелым» силиконовым маслом (рис. 5, 6).

Как демонстрируют диаграммы распределения давления, прижимающий эффект в отношении сетчатки со стороны силиконового масла наблюдается лишь в нижних отделах витреальной полости (в положении стоя), а по мере приближения к верхним отделам прижимающее усилие силиконовой тампонады сводится к нулю, причем это справедливо как для «легкого», так и для «тяжелого» силиконового масла. Данный факт объясняется тем, что удельный вес силиконового масла практически не отличается от такового у воды ($0,95-0,98 \text{ г/см}^3$ для «легкого» силикона и $1,02-1,06 \text{ г/см}^3$ — для «тяжелого»). Удержание сетчатки в нормальном анатомическом положении посредством силиконовой тампонады обеспечивается исключительно тем, что заполняющее витреальную полость силиконовое масло, будучи гидрофобным, оттесняет водную среду от разрывов сетчатки и препятствует тем самым проникновению жидкости через разрывы в субретинальное пространство. При этом «легкое» силиконовое масло выполняет эту функцию в верхних отделах сетчатки, а «тяжелое» — в нижних. Однако силиконовое масло практически не прижимает сетчатку к подлежащим тканям, поэтому силиконовая тампонада эффективна исключительно при условии, что абсолютно полностью устранены все тракции, а имеющиеся разрывы сетчатки — небольшие либо среднего размера. Если же будет тракционное воздействие на близлежащие к разрыву участки сетчатки, то лишь одного эффекта отталкивания

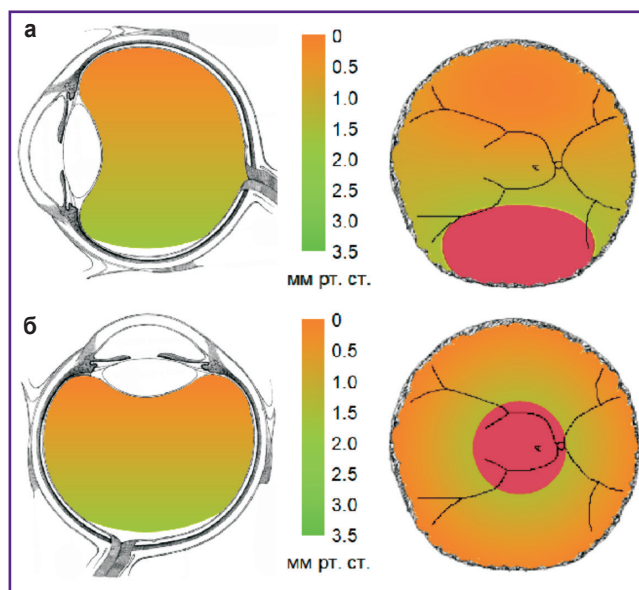


Рис. 5. Распределение давления, прижимающего сетчатку к подлежащим тканям, при тампонаде витреальной полости «легким» силиконовым маслом для случая круговой ретиномии:

а — в положении стоя; *б* — в положении лежа на спине; *слева* — общий вид тампонирующей витреальной полости; *справа* — схематичное изображение глазного дна; красным цветом показана сетчатка в зоне нетампонирующей витреальной полости

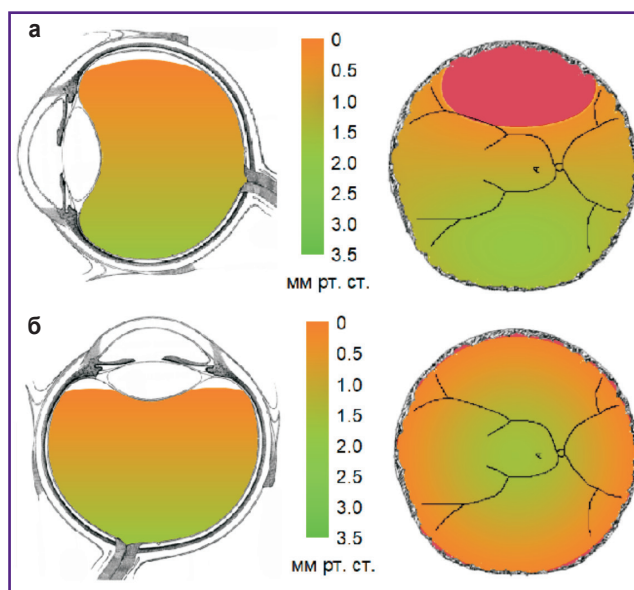


Рис. 6. Распределение давления, прижимающего сетчатку к подлежащим тканям, при тампонаде витреальной полости «тяжелым» силиконовым маслом для случая круговой ретиномии:

а — в положении стоя; *б* — в положении лежа на спине; *слева* — общий вид тампонирующей витреальной полости; *справа* — схематичное изображение глазного дна; красным цветом показана сетчатка в зоне нетампонирующей витреальной полости

жидкости от зоны возможного проникновения через разрыв под сетчатку будет недостаточно. Несмотря на наличие в витреальной полости силиконового масла, тампонирующий эффект будет равен нулю, так как разрыв сетчатки будет открыт для проникновения ВГЖ под нее; через это отверстие в субретинальное пространство будет по-прежнему проникать жидкость, вызывая тем самым в большей или меньшей степени отслойку сетчатки. Таким образом, в тех случаях, когда необходимо прижимающее действие на сетчатку, одной лишь силиконовой тампонады может быть недостаточно.

Итак, в случае локализации разрывов и дефектов сетчатки исключительно в ее верхней либо нижней полусфере задача решается посредством тампонады «легким» либо «тяжелым» силиконом. Вместе с тем нередко создаются ситуации, требующие полноценного тампонирующего эффекта во всех отделах витреальной полости: например, в случаях, когда невозможно абсолютно полно удалить эпиретинальные мембраны и добиться полной либо необходимой мобилизации сетчатки. В ходе такого лечения возникает необходимость частичной либо круговой ретиномии, а если клинический случай характеризуется также наличием разрыва в противоположном квадранте сетчатки, то создается ситуация, которую сложно разрешить традиционными методами. Рассмотрим

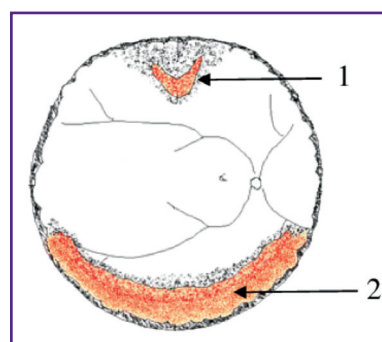


Рис. 7. Сложный случай отслойки сетчатки, сочетающий разрыв в верхнем квадранте с необходимостью нижней частичной ретиномии:

1 — клапанный разрыв сетчатки; 2 — зона ретиномии

одну из таких сложных ситуаций: например, в верхнем квадранте сетчатки имеется разрыв, а в нижних отделах необходимо выполнить ретиномию, так как не существует возможности расправить сетчатку другим способом (рис. 7). Подобные ситуации имеют место в реальной клинической практике. В этих случаях перед хирургом возникает дилемма, как добиться надежного тампонирующего эффекта одновременно в верхней и нижней полусферах витреальной полости, если

«легкий» силикон обеспечивает полноценный эффект только в верхних отделах витреальной полости, а «тяжелый» — в нижних.

Один из вариантов в такой ситуации — разделить операцию на два этапа: на первом добиться хорошей фиксации сетчатки в верхней (или нижней) зоне, а затем переходить ко второму этапу, с тем чтобы сначала достичь прилегания хотя бы в одной полусфере сетчатки в надежде на ее полное прилегание в результате второй операции [4]. Такой двухэтапный подход был бы оправдан, если бы единственной целью хирургического лечения отслойки сетчатки был анатомический успех. Если же принимать во внимание и функциональный исход операции, то вышеописанный подход противоречит фундаментальному принципу: чем дольше длительность существования отслойки сетчатки, тем хуже функциональный результат лечения. В этом аспекте вышеописанный поэтапный метод представляет собой «метод отчаяния»: в силу невозможности в кратчайшие сроки вернуть в нормальное анатомическое положение всю сетчатку одновременно приходится ограничиваться прилеганием хотя бы одной ее полусферы. Безусловно, наиболее рациональным является подход, при котором возможно добиться хорошей адаптации и удержания сетчатки на время формирования хориоретинальной спайки одновременно и в верхних, и в нижних отделах. Сделать это можно следующим образом: использовать дополнительные возможности модернизации хирургического вмешательства, а именно дополнить выполнение силиконовой тампонады методами, которые позволяют добавочно фиксировать сетчатку в нормальном анатомическом положении в тех зонах, на которые тампонирующий эффект силикона не распространяется, а также в тех случаях, когда прижимающий эффект в отношении сетчатки со стороны силикона может ока-

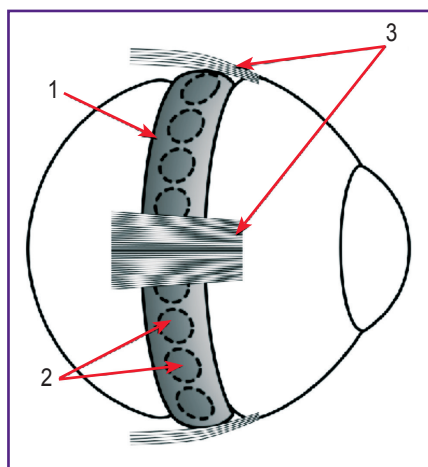


Рис. 8. Схематическое изображение глазного яблока с круговым склеральным вдавливанием, выполненным наружной магнитной пломбой:

1 — пломба, 2 — магниты; 3 — прямые мышцы глаза

заться недостаточным чисто физически. Такая механическая фиксация сетчатки может понадобиться во время операции не только в случае непосредственного выполнения ретиномии, но также в случаях, когда в отдельных зонах не удастся полностью отделить стекловидное тело от сетчатки, в результате чего эти зоны остаются опасными с точки зрения формирования эпиретинального фиброза и риска возникновения необходимости ретиномии.

Предлагаемая технология механической фиксации сетчатки. С целью создания возможности дополнительной механической фиксации сетчатки авторами разработана новая технология, которая заключается в модификации процесса эписклерального пломбирования, широко используемого для лечения отслойки сетчатки, в том числе в комбинации с витреоретинальным вмешательством. Следует отметить, что комбинированные эписклеральные и эндовитреальные хирургические вмешательства в настоящее время снова пользуются вниманием исследователей, так как на сегодняшний день накоплены данные, что такие вмешательства повышают частоту анатомического успеха лечения в осложненных случаях отслойки сетчатки [5–8].

Предлагаемое авторами устройство — двойной магнитоактивный фиксатор сетчатки — потенциально способно осуществлять ее прижатие за счет взаимного притяжения подшиваемой к склере наружной магнитной пломбы и внутренних магнитных пломб из магнитоактивного эластомера, накладываемых на сетчатку в проекции наружной магнитной пломбы. Наружная магнитная пломба выполнена из медицинского силикона и внешне не отличается от обычной, при этом внутри содержит постоянные магниты системы неодим–железо–бор (рис. 8). Теоретически она может быть различной формы и размеров. Со стороны витреальной полости предлагается использовать внутренние магнитные пломбы, представляющие собой тонкий эластичный силиконовый имплантат, в который введены ферромагнитные вещества таким образом, что ферромагнетик находится внутри имплантата и не контактирует с тканями глаза. За счет взаимного притяжения наружной и внутренних магнитных пломб реализуется эффект удержания сетчатки в нормальном анатомическом положении (рис. 9). В качестве внутренней магнитной пломбы используют один или несколько плоских элементов.

На рис. 8, 9 показано применение устройства в случае кругового наложения пломбы. Такое наложение выбрано для наглядности возможностей использования в этом случае дополнительной механической фиксации сетчатки в любом квадранте. На практике таким же образом можно выполнять не только круговое пломбирование, но и секторальное, двухсекторальное или радиальное вдавление склеры. Применение магнитной пломбы принципиально не нарушает техники операции эписклерального пломбирования, так как не меняет ни диаметра пломбы, ни ее упруго-эластиче-

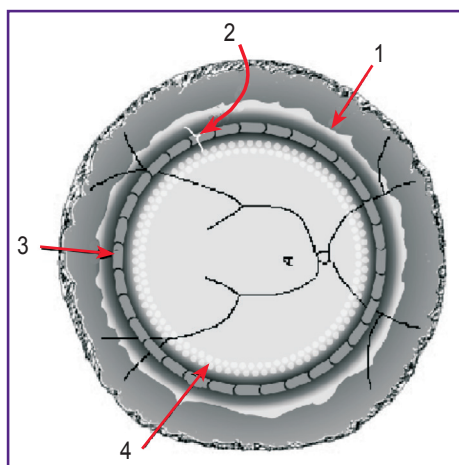


Рис. 9. Схематическое изображение глазного дна после круговой ретиномии и применения внутренних магнитных пломб:

1 — край сетчатки, образованный ретиномией; 2 — вал вдавления, образованный подшитой к склере наружной магнитной пломбой; 3 — внутренние магнитные пломбы, наложенные на сетчатку в проекции наружной магнитной пломбы; 4 — круговая эндолазеркоагуляция

ских свойств: по свойствам магнитная пломба также не отличается от обычной пломбы.

Необходимость механической фиксации сетчатки может понадобиться как в случае ретиномии при наличии остаточных ретинальных тракций, так и в случаях без прямой необходимости вмешательства, когда какую-либо зону сетчатки не удастся полностью освободить от стекловидного тела, а потому эта зона является опасной с точки зрения формирования фиброза и риска возникновения необходимости дополнительной ретиномии. От выполнения этой операции по возможности стараются воздерживаться, избегая тем самым нанесения дополнительной травмы, так как минимизация травмирования — одна из основных аксиом хирургии. Если имеется высокий риск ретиномии в перспективе, использование дополнительной механической фиксации сетчатки может оказаться решающим фактором, позволяющим в конечном итоге избежать ее выполнения, так как прижимающее действие со стороны внутренних магнитных пломб может оказать противодействие тракционному усилию формирующейся эпиретинальной мембраны, направленному на смещение сетчатки с ее нормального анатомического положения. Речь не идет о противостоянии тракциям со стороны мощных сформированных эпиретинальных мембран, но при начинающемся эпиретинальном фиброзе дополнительная механическая фиксация сетчатки может позволить выиграть время на тот момент, пока в области интраоперационно произведенной лазеркоагуляции сформируется надежная хориоретинальная спайка, которая эффективно удерживает сетчатку в нормальном анатомическом положении.

Предлагаемое устройство позволяет оказывать на сетчатку прижимное действие до 3,5 мм рт. ст, активно удерживая ее в нормальном анатомическом положении. Варьирование состава внутренней пломбы и размера наружных магнитов позволяет изменять давление в широких пределах [9]. Устройство дает возможность не только эффективно прижимать сетчатку к подлежащим тканям на операционном столе на время проведения лазеркоагуляции, но и поддерживать ее нормальное анатомическое положение в послеоперационном периоде, в то время как применение только силиконового масла практически не оказывает прижимающего действия в отношении сетчатки (рис. 10, 11).

Необходимость дополнительной механической фиксации края сетчатки может возникать не только при наличии персистирующих тракций, вызванных пролиферативной витреоретинопатией, но и при расправлении сетчатки в случае гигантского разрыва с тракцией или ее отрыва от зубчатой линии на большом протяжении. Травматические отслойки сетчатки со свойственными им многообразием и сложностью также представляют собой большую проблему для витреоретинальной хирургии. В большинстве случаев, неотягощенных выраженным эпиретинальным фиброзом, наличием каких-либо грубых тяжей, задача с большой долей вероятности может решаться традиционными методами, однако бывают ситуации, когда не представляется возможным достичь хотя бы частичного восстановления

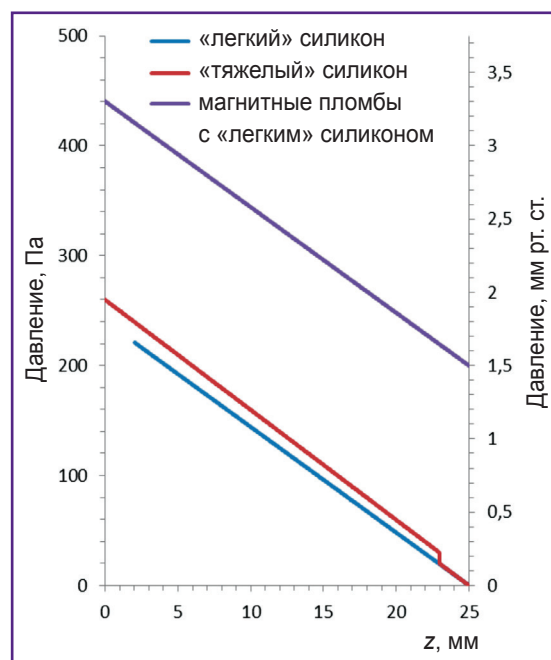


Рис. 10. Зависимость давления, оказываемого на сетчатку, от высоты z для случаев «легкого» и «тяжелого» силиконового масла (в положении лежа на спине). В том же масштабе показано давление, возникающее при использовании наружной пломбы с магнитами диаметром 3 мм и внутренних пломб толщиной 0,2 мм

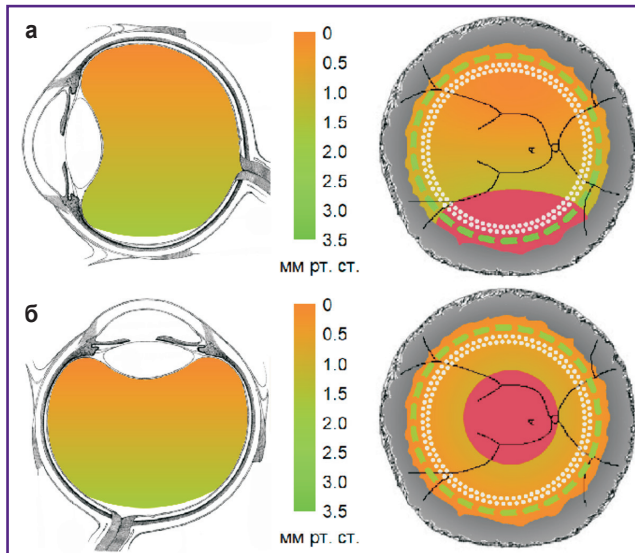


Рис. 11. Распределение давления, прижимающего сетчатку к подлежащим тканям, при использовании магнитных пломб комбинированно с тампонадой витреальной полости «легким» силиконовым маслом для случая круговой ретиномии:

а — в положении стоя; **б** — в положении лежа на спине

зрения иначе, кроме как посредством механической фиксации сетчатки к подлежащим оболочкам. Такие случаи до сих пор встречаются, и справиться с ними обычными методами иногда невозможно.

Для тяжелых случаев ранее предлагались ретинальные гвозди с целью механической фиксации сетчатки [10]. Они помогали удерживать ее в нормальном анатомическом положении, что делало возможным проведение лазеркоагуляции. В случае отрыва от зубчатой линии на большом протяжении механическая фиксация сетчатки помогала достичь ее прилегания без образования складок [10]. Первые результаты краткосрочных наблюдений применения ретинальных гвоздей были положительными [11–14] и привели к их распространению в качестве дополнительного инструмента лечения осложненных отслоек сетчатки. Однако неэффективность ретинальных гвоздей в фиксации сетчатки при выраженной пролиферативной витреоретинопатии привела к быстрому отказу от их использования во всех случаях, включая менее осложненные [10].

Вместе с тем в число технических трудностей, возникающих при хирургическом лечении гигантских разрывов сетчатки, травматических разрывов сетчатки и отрывов от зубчатой линии на большом протяжении, в ряде случаев входит и склонность сетчатки заворачиваться внутрь и препятствовать разворачиванию. Ригидная скрученная сетчатка может не прилегать даже при применении перфторорганических соединений (ПФОС). У таких пациентов из возможных альтернативных решений остаются ретинэктомия или

применение механической фиксации сетчатки, возможно с предварительной ретинэктомией. Особого внимания заслуживают случаи, требующие круговой ретиномии: после ее выполнения край оставшегося круга сетчатки нередко оказывается волнистым из-за остаточных интравитреальных тракций и сетчатка не прилегает под действием ПФОС. Такое положение делает невозможным проведение лазеркоагуляции и, соответственно, не позволяет завершить операцию с использованием стандартных методов.

Для указанных ситуаций предлагалась также шовная фиксация сетчатки. Так, Х.П. Тахчиди и соавт. [15] и Н.П. Паштаев и соавт. [16] выполняли шовную фиксацию при гигантских разрывах и отрывах сетчатки от зубчатой линии. Фиксацию края ретинального дефекта осуществляли следующим образом: через склеротомический порт 23G в полость стекловидного тела вводили прямую иглу при помощи специального кангового пинцета. Производили трансретиносклеральный прокол изнутри наружу по краю ретинального дефекта с выводом иглы на наружную поверхность заранее освобожденной от конъюнктивы склеры. Концы нити связывали узлом на наружной поверхности склеры [16]. По данным авторов, способ позволяет восстановить нормальное анатомическое положение сетчатки при гигантских разрывах и отрывах от зубчатой линии.

Однако шовный метод фиксации, как и ретинальные гвозди, в настоящее время не имеет широкого клинического применения. Оба метода в большей или меньшей степени обладают некоторыми недостатками, а именно малым соотношением площади фиксации сетчатки на единицу приложения усилия (вкалывание гвоздя, прокол оболочек) и недостаточной степенью герметичности фиксации. В любом случае между швами либо между вколотыми гвоздями остается зона непрочного прилегания. Другим недостатком является травматичность: применение ретинальных гвоздей несет в себе риск возможного первичного избыточного давления на сетчатку с ее разможжением, которое не только может сопровождаться кровотечением, но и потенциально способно вносить вклад в прогрессию пролиферативной витреоретинопатии.

В случае применения разработанного авторами способа дополнительной механической фиксации сетчатки, реализуемого за счет сил магнитного взаимодействия, на сетчатку оказывается мягкое прижимающее воздействие наложенным магнитным материалом внутренних (эндовитреальных) пломб, исключающее ее разможжение во время имплантации и не требующее прокалывания оболочек. Способ позволяет осуществлять плоскостное прижатие сетчатки, герметично окружающее зоны разрывов и дефектов. Предлагаемое устройство дает возможность зафиксировать края дефектов сетчатки на большом протяжении, особенно в случаях «волнистых» или «закручивающихся» краев, затрудняющих расправ-

ление и прилегание, а также при риске попадания под сетчатку тампонирующих веществ, при этом максимально сберегается ткань сетчатки.

Цель исследования — разработать технологию, позволяющую удерживать сетчатку в нужном анатомическом положении в тех областях, где тампонирующий эффект силикона неполноценен, которая может применяться в осложненных случаях отслойки сетчатки с гигантскими разрывами, ретинодиализом или трудноудаляемыми эпиретинальными мембранами в случае пролиферативной витреоретинопатии.

Материалы и методы

Выполнена серия экспериментальных исследований на кадаверных глазах с максимальным приближением ситуации к естественным условиям: использовали аналогичное оборудование, которое обычно применяется для проведения витреоретинальных вмешательств, после подшивания эписклеральных магнитных пломб выполняли витрэктомию, ретинотомию, введение ПФОС и наложение на сетчатку внутренних магнитных пломб. Для эписклерального пломбирования использовали магнитные пломбы диаметром 4–5 мм, содержащие расположенные в один ряд дисковидные неодимовые магниты диаметром 3 или 4 мм и толщиной 1 мм. Наружные магнитные пломбы другого типа содержали 2 ряда неодимовых магнитов диаметром 2 мм (рис. 12, 13). Данные пломбы (прототипы) позволяют в эксперименте сделать вдавление склеры локально (секторально или радиально) либо выполнить круговое вдавление склеры аналогично применению обычной стандартной пломбы. Исследовались не только дисковидные, но и прямоугольно-параллелепипедные магниты в составе наружных магнитных пломб, а также были опробованы наружные магнитные пломбы с различными вариантами полярности расположения магнитов.

Для дополнительной механической фиксации сетчатки со стороны витреальной полости вводили внутренние магнитные пломбы — экспериментальные образцы магнитоактивного эластомера длиной



Рис. 12. Эписклеральная магнитная пломба для кругового вдавления склеры

Пломба выполнена из медицинского силикона, содержит внутри постоянные магниты системы неодим–железо–бор диаметром 3 мм

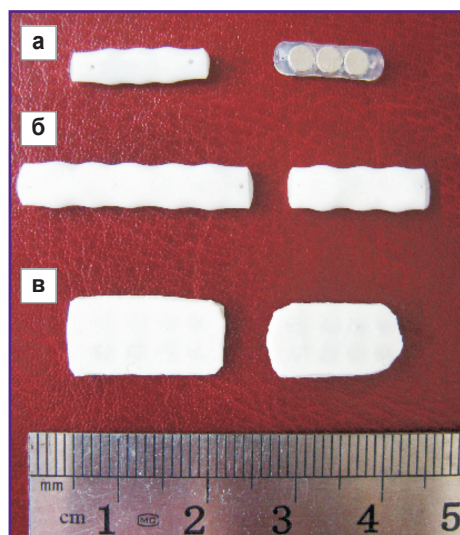


Рис. 13. Экспериментальные образцы эписклеральных магнитных пломб для секторального вдавления склеры

Пломбы содержат постоянные магниты: а — диаметром 3 мм; б — диаметром 4 мм; в — два ряда магнитов диаметром 2 мм

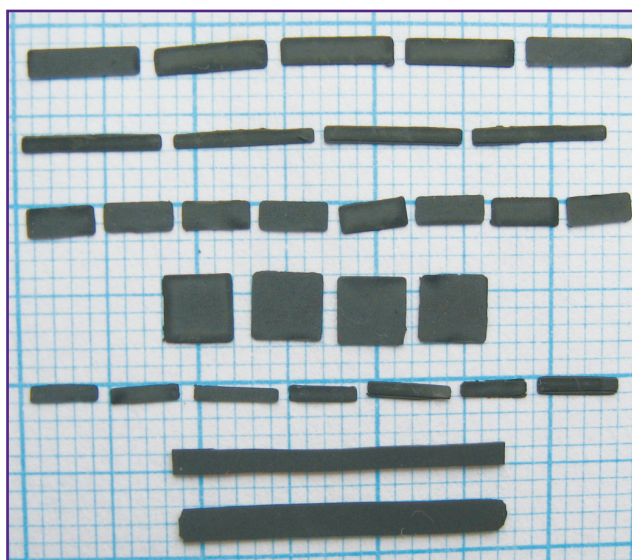


Рис. 14. Экспериментальные образцы внутренних (эндовитреальных) магнитных пломб различного размера и формы

Пломбы выполнены из силиконового эластомера, содержащего частицы железа диаметром 10 мкм; ферромагнитные частицы изолированы от витреальной полости, так как покрыты чистым силиконом

3–10 мм, шириной 1–2 мм и толщиной 0,2–0,4 мм. Имплантаты были выполнены из мягкого упругого эластичного силиконового эластомера, в котором ферромагнитные частицы диаметром менее 20 мкм изолированы от витреальной полости, так как покрыты слоем чистого силикона (рис. 14). Имплантаты легко

вводятся при помощи инжектора через разрез 20G в плоской части цилиарного тела, обладают достаточными прочностными характеристиками и не повреждаются в процессе работы. Одну за другой вводили до 10 внутренних магнитных пломб, которые укладывали по краю искусственно сформированных витреотомом разрывов сетчатки. Из пломб составляли непрерывные криволинейные контуры произвольной конфигурации, окружающие разрывы сетчатки любой формы и размеров.

Результаты

Проведенные эксперименты подтвердили теоретические предпосылки: технически выполнимо придание магнитных свойств обычной пломбе, традиционно применяемой для эписклерального пломбирования, без изменения ее размеров и других механических свойств. Модифицированная пломба внешне не отличима от традиционной и не вносит каких-либо дополнительных затруднений в проведении операции. Подшивание магнитной пломбы с точки зрения хирурга никоим образом не затруднено и в целом не отличимо от обычного эписклерального пломбирования. Эндовитреальные имплантаты из магнитоактивного эластомера хорошо ложатся, ровно, плотно и качественно удерживают сетчатку, придавливая ее к подлежащим оболочкам без видимых признаков формирования пролежня, а именно: пломба лежит на поверхности сетчатки ровно, не вызывает какого-либо грубого вдавления или деформации оболочек.

Апробация различных размеров пломб в ходе операций позволяет сделать вывод, что наиболее оптимальными для технического осуществления процесса являются пломбы длиной не более 5 мм. Проверка возможности применения более длинных пломб для получения линии фиксации показала, что интраоперационные манипуляции с ними затруднены. Относительно короткие фрагменты длиной 3–5 мм позволяют выполнять все необходимые манипуляции. Выстраивая внутренние пломбы друг за другом, можно составить из них единую линию непрерывной герметичной фиксации сетчатки. По завершении хирургического лечения пломбы легко удалить посредством витреотома 25G.

Таким образом, с учетом вышеописанных аспектов гидростатики силиконовой тампонады витреальной полости можно предполагать с большой долей вероятности, в какой зоне сетчатки при тампонаде силиконом возникает эффект прижатия к подлежащим тканям, в какой — лишь эффект оттеснения водной среды от сетчатки, а какие зоны остаются лишены тампонирующего эффекта, и при необходимости в зоне недостаточного эффекта использовать возможности дополнительной механической фиксации сетчатки. Предлагаемая новая медицинская технология позволяет эффективно удерживать сетчатку силами

магнитного взаимодействия. Магнитная эписклеральная пломба может использоваться не только комбинированно с внутренними (эндовитреальными) пломбами со стороны витреальной полости, но и сама по себе (например, на том этапе, когда планируется только эписклеральное пломбирование без выполнения витрэктомии). Модифицированная пломба при этом не оказывает какого-либо дополнительного воздействия на глаз по сравнению с обычной. Магнитная пломба выполняет все функции обычной, и в случае, если посредством эписклерального пломбирования будет благополучно достигнуто стойкое прилегание сетчатки, магнитные свойства этой пломбы не будут использованы. Однако если в послеоперационном периоде патологический процесс, приведший к возникновению отслойки сетчатки, будет продолжать развиваться, в тяжелых случаях можно будет воспользоваться дополнительными возможностями механической фиксации сетчатки со стороны витреальной полости. В этой связи в будущем может возникнуть представление о целесообразности изготовления всех пломб магнитными — таким образом хирург сможет подстраховаться от тяжелого случая: под рукой всегда будет возможность дополнительной фиксации сетчатки как в послеоперационном периоде (в случае возникновения такой необходимости), так и непосредственно в ходе операции.

Заключение

Известный эффект, когда «легкое» силиконовое масло в витреальной полости всплывает, оставляя без эффекта тампонады нижние отделы сетчатки, а при использовании «тяжелого» силикона без эффекта тампонады остаются верхние отделы, позволяет рассматривать дополнительную фиксацию сетчатки в нужных зонах с помощью магнитной эписклеральной пломбы как инструмент, способный повысить частоту успешного хирургического лечения отслоек сетчатки.

Несмотря на то, что в большинстве случаев традиционные методы хирургического лечения отслоек сетчатки могут быть вполне достаточными, в отдельных осложненных случаях механическую фиксацию можно применять как безопасное дополнительное или альтернативное средство. В комбинации со стандартными техниками механическая фиксация может помочь пациентам, у которых другим путем достичь прилегания сетчатки было бы сложно или невозможно.

Благодарность. Авторы благодарны сотрудникам компании ЗАО «МедСил» А.В. Горшкову и Н.Р. Валетовой за помощь в изготовлении магнитных пломб.

Финансирование исследования. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №16-15-00208).

Конфликт интересов. У авторов нет конфликта интересов.

Литература/References

1. Fawcett I.M., Williams R.L., Wong D. Contact angles of substances used for internal tamponade in retinal detachment surgery. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 1994; 32(7): 438–444, <https://doi.org/10.1007/bf00186587>.
2. Rush R., Sheth S., Surka S., Ho I., Gregory-Roberts J. Postoperative perfluoro-n-octane tamponade for primary retinal detachment repair. *Retina* 2012; 32(6): 1114–1120, <https://doi.org/10.1097/iae.0b013e31822f56f6>.
3. Eames I., Angunawela R.I., Aylward G.W., Azarbadegan A. A theoretical model for predicting interfacial relationships of retinal tamponades. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2010; 51(4): 2243–2247, <https://doi.org/10.1167/iovs.09-4442>.
4. Wong D., Cazabon S., Ali H., Kumar I., Valldeperas X., Groenewald C., Pearce I. Can the sequential use of conventional silicone oil and heavy oil be a strategy for the management of proliferative vitreoretinopathy? *Ann Acad Med Singapore* 2006; 35(3): 181–184.
5. Schaal S., Sherman M.P., Barr C.C., Kaplan H.J. Primary retinal detachment repair: comparison of 1-year outcomes of four surgical techniques. *Retina* 2011; 31(8): 1500–1504, <https://doi.org/10.1097/iae.0b013e31820d3f55>.
6. Mehta S., Blinder K.J., Shah G.K., Grand M.G. Pars plana vitrectomy versus combined pars plana vitrectomy and scleral buckle for primary repair of rhegmatogenous retinal detachment. *Can J Ophthalmol* 2011; 46(3): 237–241, <https://doi.org/10.1016/j.jcjo.2011.05.003>.
7. Storey P., Alshareef R., Khuthaila M., London N., Leiby B., DeCroos C., Kaiser R.; Wills PVR Study Group. Pars plana vitrectomy and scleral buckle versus pars plana vitrectomy alone for patients with rhegmatogenous retinal detachment at high risk for proliferative vitreoretinopathy. *Retina* 2014; 34(10): 1945–1951, <https://doi.org/10.1097/iae.0000000000000216>.
8. Rush R., Simunovic M.P., Sheth S., Chang A., Hunyor A.P. 23-gauge pars plana vitrectomy versus scleral buckling versus combined pars plana vitrectomy–scleral buckling for medium-complexity retinal detachment repair. *Asia Pac J Ophthalmol* 2014; 3(4): 215–219, <https://doi.org/10.1097/apo.000000000000013>.
9. Makarova L.A., Nadzharyan T.A., Alekhina Y.A., Stepanov G.V., Kazimirova E.G., Perov N.S., Kramarenko E.Yu. Magnetoactive elastomer as an element of a magnetic retina fixator. *Smart Materials and Structures* 2017; 26(9): 095054, <https://doi.org/10.1088/1361-665x/aa82e9>.
10. Puustjärvi T.J., Teräsvirta M.E. Retinal fixation of traumatic retinal detachment with metallic tacks: a case report with 10 years' follow-up. *Retina* 2001; 21(1): 54–56, <https://doi.org/10.1097/00006982-200102000-00009>.
11. Burke J.M., McDonald H.R., Neuwirth J., Lewandowski M. Titanium retinal tacks with pneumatic insertion. Histologic evaluation in rabbits. *Arch Ophthalmol* 1987; 105(3): 404–408, <https://doi.org/10.1001/archophth.1987.01060030124041>.
12. Ohira A., de Juan E., Tsai M. Long-term histologic and electrophysiologic evaluation of the alloy retinal tack. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 1991; 229(1): 95–98, <https://doi.org/10.1007/bf00172270>.
13. Tripathi R.C., Pon D.M., Levine R.A., Tripathi B.J., Falckh R.C., Moffat K.P. Retinal tacks: tolerance and tissue reaction in a human eye. *Ophthalmic Surg* 1989; 20(9): 658–662.
14. de Juan E. Jr., McCuen B.W., Machemer R. Mechanical retinal fixation using tacks. *Ophthalmology* 1987; 94(4): 337–340, [https://doi.org/10.1016/s0161-6420\(87\)33441-4](https://doi.org/10.1016/s0161-6420(87)33441-4).
15. Тахчиди Х.П., Казайкин В.Н. Шовная фиксация сетчатки при гигантских разрывах и отрывах сетчатки от зубчатой линии с применением перфторорганических соединений. *Офтальмохирургия* 1996; 4: 23–28. Takhchidi Kh.P., Kazaykin V.N. Suture fixation of the retina in giant tears and abruptions of retina from the dentate line with the use of perfluororganic compounds. *Oftal'mokhirurgiya* 1996; 4: 23–28.
16. Паштаев Н.П., Григорьева И.Н. Первый опыт применения микроинвазивной шовной фиксации гигантских разрывов и отрывов сетчатки. *Офтальмохирургия* 2012; 1: 58–61. Pashtaev N.P., Grigorieva I.N. The first experience of microinvasive suture fixation of giant tears and abruptions of retina. *Oftal'mokhirurgiya* 2012; 1: 58–61.