

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВНУТРИКАПСУЛЬНОГО КОЛЬЦА ИЗ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ НИТЕЙ

Аннотация. В статье путем математического моделирования рассчитываются оптимальные параметры жесткости внутрикапсульных стабилизирующих колец из полипропиленовых нитей для взаимодействия с капсулой хрусталика. Одновременно обосновывается возможность дозирования эффекта растяжения капсульного мешка хрусталика и получения требуемого результата вне зависимости от его индивидуальных параметров.

Ключевые слова: хрусталик, капсульный мешок хрусталика, внутрикапсульное стабилизирующее кольцо, параметры жесткости.

Abstract. The article is focused on the calculation by means of mathematical modeling of the optimum rigidity parameters of capsule tension rings of polypropylene strings for its communication with the lens capsule. At the same time the possibility of dosing the effect of stretching of the lens capsular bag and obtaining the desired result regardless of the CB individual parameters is substantiated.

Key words: crystalline lens, capsular bag, capsule tension ring, rigidity parameters.

Применение внутрикапсульных стабилизирующих колец (ВСК) прочно вошло в современную интраокулярную коррекцию. Одним из важных параметров ВСК является их жесткость, которая обусловлена материалом кольца, его формой, сечением, размером и типом – замкнутое или разомкнутое, а для последнего – и величиной зазора между его концами. Данный параметр является, как правило, постоянной величиной, присущей определенной модели ВСК. Вместе с тем известно широкое различие анатомических и биомеханических свойств капсульного мешка хрусталика (КМХ) и его связочного аппарата [1]. Данное обстоятельство требует наличия в арсенале хирурга различных по жесткости и размерам моделей ВСК, проведения ряда дополнительных исследований для определения диаметра и состояния КМХ, а его недооценка может приводить как к недостаточному эффекту растяжения и стабилизации КМХ, так и к его повреждению [2–4].

С целью снижения вероятности осложнений, связанных с несоответствием параметров КМХ и ВСК, нами предложен способ дозированного растяжения КМХ эластичным кольцом, образованным несколькими витками полипропиленовой нити [5]. Эластичную нить, в состоянии покоя представляющую собой прямую, располагают в сводах КМХ по типу спирали (рис. 1). Эффект дозирования при растяжении КМХ достигается выбором длины и сечения эластичной нити. Ранее опытно-экспериментальным путем нами были установлены параметры эластичных нитей из полипропилена, требуемые для осуществления способа, и разработаны варианты имплантации ВСК [6].

В настоящей работе представлено математическое обоснование способа дозированного растяжения КМХ кольцом, образованным нитями из полипропилена.

Цель исследования – определить путем математического моделирования оптимальные параметры внутрикапсульных колец, образованных из полипропиленовых нитей.

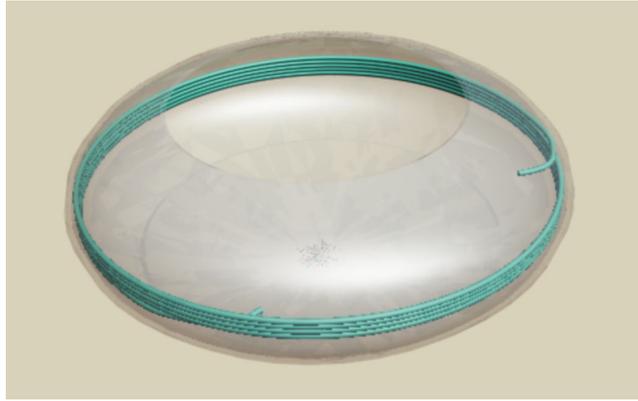


Рис. 1. Схема эндокапсулярного расположения ВСК из полипропиленовых нитей

1. Материалы и методы исследования

Для реализации способа нами были выбраны нити из полипропилена как материала с известными свойствами, давно и успешно применяемого в интраокулярной хирургии, в том числе для изготовления гаптических элементов интраокулярной линзы (ИОЛ) и ВСК [2, 7]. Были использованы нити 4/00 и 5/00 диаметром 0,12 и 0,17 мм [8].

Для создания математической модели взаимодействия полипропиленовой нити с КМХ применяли методику описания напряженного состояния упругого стержня [9].

С точки зрения механики деформируемого тела образованное из эластичных нитей ВСК естественно рассматривать как тонкие прямолинейные стержни, абсолютно свободные на концах, помещенные в эластичную форму окружности с известным диаметром [10].

После установки ВСК из нитей полипропилена в капсулу хрусталика «стержни» оказываются изогнутыми по форме окружности, и возникает реакция взаимодействия – сосредоточенные силы и моменты. Таким образом, оценка напряженно деформированного состояния ВСК, образованного эластичными нитями, состоит в анализе изгибов образованных ими петель.

В полярных координатах (r, φ) с началом в центре кольца (КМХ) уравнение срединной линии упругой нити имеет следующий вид:

$$(r^2 + r'^2)^{3/2} = R(\varphi)(r^2 - rr'' + 2r'^2),$$

где r' и r'' – первая и вторая производные радиус-вектора срединной линии кольца по координате φ ; $R(\varphi)$ – радиус кольца в соответствующем направлении.

Энергия изгиба из состояния $R_0(\varphi)$ в состояние $R(\varphi)$ равна

$$U = \frac{I}{2} \int E(\varphi) \left(\frac{1}{R(\varphi)} - R_0(\varphi) \right)^2 R_0(\varphi) d\varphi,$$

где интеграл берется на интервале $[\varphi^1, \varphi^2]$, соответствующем концам нити по большему периметру; при исходной длине нити, превосходящей внутренний периметр капсулы в напряженном состоянии, имеется перехлест, при котором

$\varphi^2 > \varphi^1 + 2\pi$ (несколько оборотов нити); $E(\varphi)$ – модуль Юнга материала кольца; I – момент инерции поперечного сечения кольца; $R_0(\varphi)$ – радиус начальной формы кольца.

Уравнение равновесия получаем, исходя из вариационного принципа, применяя метод Лагранжа

$$\delta U - \int \delta(R(\varphi)R_0(\varphi)Q(\varphi))d\varphi = 0$$

при условии неизменности длины кольца, определяемого диаметром КМХ:

$$\int \delta(R(\varphi))d\varphi = 0,$$

где $Q(\varphi)$ – распределенная по периметру нити нагрузка со стороны КМХ.

2. Результаты и их обсуждение

В табл. 1 представлены результаты расчетов геометрических и биомеханических характеристик взаимодействия нити из полипропилена с КМХ.

Таблица 1

Результаты расчетов геометрических и биомеханических характеристик взаимодействия нити из полипропилена с КМХ

Диаметр КМХ	Количество витков нити	Длина нити	Диаметр сечения нити 4/00, мм	Диаметр сечения нити 5/00, мм	Жесткость сечения нити 4/00, Н	Жесткость сечения нити 5/00, Н	Сила воздействия на КМХ нити 4/00, мН	Сила воздействия на КМХ нити 5/00, мН
10,5	1	32,97	0,17	0,12	21,55	10,74	1,713	0,853
10,5	1,5	49,46	0,17	0,12	21,55	10,74	2,098	1,045
10,5	2	65,94	0,17	0,12	21,55	10,74	2,422	1,207
10,5	2,5	82,43	0,17	0,12	21,55	10,74	2,708	1,349
10,5	3	98,91	0,17	0,12	21,55	10,74	2,967	1,478
10,5	3,5	115,40	0,17	0,12	21,55	10,74	3,204	1,597
10,5	4	131,88	0,17	0,12	21,55	10,74	3,426	1,707
10,5	4,5	148,37	0,17	0,12	21,55	10,74	3,633	1,810
10,5	5	164,85	0,17	0,12	21,55	10,74	3,830	1,908

На рис. 2 данные результаты расчетов представлены в виде графиков. При этом диаметр КМХ принимался равным 10,5 мм, диаметр сечения нити 4/00 составил 0,17 мм, диаметр сечения нити 5/00 – 0,12 мм, жесткость сечения нити 4/00 – 21,55 Н, жесткость сечения нити 5/00 – 10,74 Н.

Анализ результатов математического моделирования, представленных на рис. 2, показывает, что сила воздействия ВСК, образованного витками эластичных нитей на КМХ, возрастает пропорционально их длине и диаметру поперечного сечения, что позволяет осуществлять дозирование эффекта. Приемлемое растяжение КМХ, на наш взгляд, создает нить 4/00 с 1–2,5 оборотами или нить 5/00 – с 3–5 оборотами. Значения жесткости ВСК при этом находятся в пределах от 1,48 до 2,71 мН/мм.

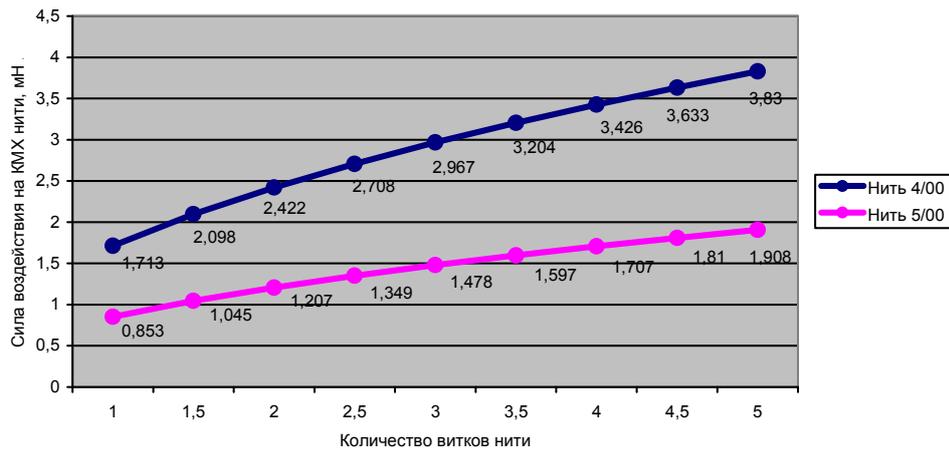


Рис. 2. Результаты расчетов геометрических и биомеханических характеристик взаимодействия нити из полипропилена с КМХ

На рис. 3 представлено обоснование выбора количества витков полипропиленовой нити на примере нити 4/00. Для графического анализа взят соответствующий график с рис. 2. Скорость прироста силы воздействия определенного количества витков нити характеризуется величиной угла α между линиями тренда к соответствующим участкам графика. Наиболее сильное растяжение КМХ получается при введении первых 1–1,5 витков (угол α_1 наибольший). На участке до 3 витков нити прирост силы воздействия кольца меньше, но получается значимым (углы α_2 и α_3). После 3 витков математически и клинически значимого растяжения КМХ почти не происходит, так как прирост силы воздействия нити минимален и наступает равновесие сил. Аналогичные расчеты были произведены для нити 5/00, где оптимальное количество витков составило от 3 до 5.

Работы, посвященные обоснованию оптимальных упругих параметров применяемых на практике, как правило, разомкнутых моделей ВСК, весьма немногочисленны. При этом результаты опытно-экспериментальных исследований и данные математического обоснования конструкций ВСК показывают, что значения упругих характеристик колец колеблются в весьма широких пределах – от 0,8162 до 4,5501 мН/мм, т.е. различаются в 5,5 раз [2, 11–13].

На практике хирурги используют ВСК различных моделей и параметров жесткости. Очевидно, что и способность противостоять сокращению КМХ при его фиброзе также является различной. В связи с этим целесообразным, на наш взгляд, может являться указание производителем ВСК, помимо их размеров, также и параметров жесткости.

Заключение

Метод математического моделирования позволяет рассчитать требуемые значения параметров жесткости ВСК, образованного витками эластичных нитей из полипропилена, а также других эластичных материалов.

Математическое моделирование дает обоснование способа дозированного растяжения КМХ интракапсульным кольцом, образованным из нескольких витков эластичных нитей.

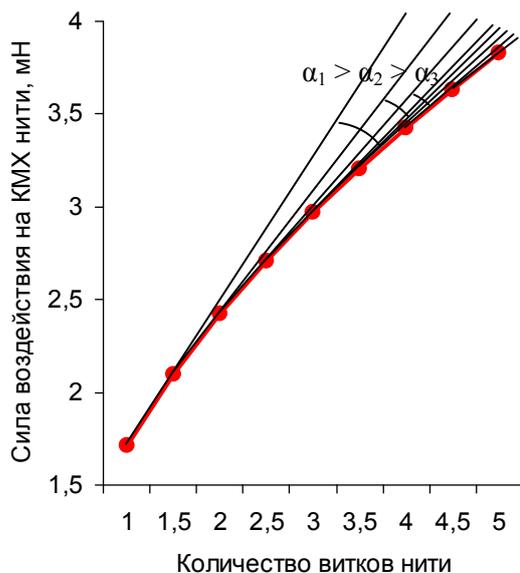


Рис. 3. Прирост силы воздействия нити из полипропилена 4/00 на КМХ в зависимости от количества витков нити

Список литературы

1. Сушкова, Н. А. Клинико-экспериментальное обоснование принципов конструирования интракапсулярных линз : автореф. дис. ... канд. мед. наук / Сушкова Н. А. – М., 1988. – 22 с.
2. Касимова, Д. П.-гызы. Разработка методов хирургической профилактики помутнений задней капсулы хрусталика : автореф. дис. ... канд. мед. наук / Касимова Д. П.-гызы. – М., 2001. – 20 с.
3. Lang, Ya. Vitrectomy to remove a posteriorly dislocated endocapsular tension ring / Ya. Lang, E. Fineberg, H. J. Garzosi // J. Cataract. Refract. Surg. – 2001. – V. 27. – P. 474–476.
4. Little, V. C. Removal of capsular tension ring the anterior chamber angle / V. C. Little, T. Richardson, S. Morris // J. Cataract. Refract. Surg. – 2004. – V. 30, № 9. – P. 1832–1834.
5. Патент РФ № 2170071. Способ растяжения капсульной сумки хрусталика / С. Л. Кузнецов. – Бюл. № 19. – 2001.
6. Кузнецов, С. Л. Экспериментальное обоснование использования эластичных нитей из полипропилена в качестве внутрикапсульного кольца / С. Л. Кузнецов // Современные технологии хирургии катаракты – 2004 : сб. науч. ст. V Междунар. науч.-практ. конф. – М. : Изд-во МНТК «Микрохирургия глаза», 2004. – С. 194–199.
7. Федоров, С. Н. Ошибки и осложнения при имплантации искусственного хрусталика / С. Н. Федоров, Э. В. Егорова. – М. : Изд-во МНТК «Микрохирургия глаза», 1992. – 248 с.
8. Горбань, А. И. Микрохирургия глаза / А. И. Горбань, О. А. Джалиашвили. – М. : Медицина, 1982. – 64 с.
9. Попов, Е. П. Теория и расчет гибких упругих стержней / Е. П. Попов. – М. : Наука, 1986. – 294 с.
10. Даль, Ю. М. О напряженно-деформированном состоянии интраокулярной линзы (ИОЛ) / Ю. М. Даль, Д. А. Морщинина // Вестник СПбГУ. Сер. 1 «Математика, механика, астрономия». – 2008. – Вып. 4. – С. 1–7.

11. **Kurz, S.** Spring constants of capsular tension rings / S. Kurz, H. D. Burkhard // J. Cataract. Refract. Surg. – 2004. – V. 30, № 9. – P. 1993–1997.
12. **Nagamoto, T.** A ring to support the capsular bag after continuous curvilinear capsulorhexis / T. Nagamoto, M. A. Bissen-Myuajima // J. Cataract. Refract. Surg. – 1994. – V. 20, № 9. – P. 417–420.
13. **Егорова, Э. В.** Оптимизация параметров интракапсулярных колец для профилактики помутнений задней капсулы хрусталика / Э. В. Егорова, И. Э. Иошин, А. И. Толчинская и др. // Биомеханика – 2004 : программа рабочего совещания. – URL: <http://www.imec.msu.ru/news/04-01-21-2134600.html>

Кузнецов Сергей Леонидович

кандидат медицинских наук, доцент,
заведующий кафедрой офтальмологии,
Пензенский институт
усовершенствования врачей

E-mail: slkclinic@gmail.com

Kuznetsov Sergey Leonidovich

Candidate of medical sciences, associate
professor, head of sub-department
of ophthalmology, Penza Institute
of Advanced Medical Studies

Бессарабов Анатолий Никитич

кандидат технических наук, заведующий
отделом математического обеспечения,
Межотраслевой научно-технический
комплекс «Микрохирургия глаза» имени
академика С. Н. Федорова (г. Москва)

E-mail: A.N.Bessarabov@mail.ru

Bessarabov Anatoly Nikitich

Candidate of engineering sciences, head
of software department, Intersectoral
research complex “Eye microsurgery”
named after the academician
S. N. Fyodorov (Moscow)

УДК 617.741.004.1

Кузнецов, С. Л.

Расчет параметров внутрикапсульного кольца из полипропиленовых нитей / С. Л. Кузнецов, А. Н. Бессарабов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки. – 2012. – № 3 (23). – С. 25–30.