

DOI: 10.15593/RZhBiomech/2021.4.02
УДК 531/534: [57+61]



**Российский
Журнал
Биомеханики**
www.biomech.ru

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЛАЗЕРНОЙ КОРРЕКЦИИ МИОПИИ МЕТОДАМИ ЛАСИК, SMILE И ФРК

С.М. Бауэр¹, Л.А. Венатовская¹, А.Б. Качанов^{2, 3}, В.В. Корников¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, e-mail: s.bauer@spbu.ru, l.venatovskaya@spbu.ru, v.kornikov@spbu.ru

² Санкт-Петербургский филиал Национального медицинского исследовательского центра «Межотраслевой научно-технический комплекс "Микрохирургия глаза" имени академика С.Н. Федорова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Российская Федерация, 192283, Санкт-Петербург, ул. Ярослава Гашека, 21, e-mail: andrey_kachanov@yahoo.com

³ Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова Минздрава России, Российская Федерация, 195067, Санкт-Петербург, Пискаревский проспект, 47

Аннотация. Исследуется изменение напряженно-деформируемого состояния внешней оболочки глаза для случая роговицы, ослабленной в ее центральной части в результате хирургической коррекции миопии. Корнеосклеральная оболочка глаза моделируется двумя сопряженными трансверсально-изотропными сферическими сегментами переменной толщины, с разными радиусами кривизны и биомеханическими свойствами. Роговица представляется многослойной оболочкой. Предполагается, что составная оболочка заполнена несжимаемой жидкостью. В программном пакете *ANSYS Inc.* выполняется построение трех различных математических моделей, описывающих операции лазерной коррекции зрения: удаление линтикулы через небольшой разрез (*SMILE*), лазерный кератомилез (ЛАСИК) и фоторефрактивную кератэктомию (ФРК). Диаметр и толщина линтикулы в модели операции *SMILE*, диаметр зоны абляции и максимальная толщина (глубина) абляции роговицы в моделях ЛАСИК и ФРК определяют область оптической хирургии и рассматриваются как сопоставимые параметры при сравнении представленных моделей. Конечно-элементное моделирование показывает, что после коррекции зрения методом ЛАСИК центральная часть роговицы имеет наибольшее смещение, а также большие напряжения в строме, чем после *SMILE* и ФРК. Показано влияние многослойной структуры роговицы и упругих характеристик склеры на биомеханику глаза в результате коррекции зрения.

Ключевые слова: внутриглазное давление, сопряженные трансверсально-изотропные оболочки, лазерная коррекция зрения, ЛАСИК, *SMILE*, фоторефрактивная кератэктомию (ФРК).

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что роговица имеет сложную биомеханическую структуру и состоит из пяти основных слоев разной толщины, обладающих разными биомеханическими свойствами (рис. 1). Строма – самый толстый слой роговицы, она расположена между

© Бауэр С.М., Венатовская Л.А., Качанов А.Б., Корников В.В., 2021

Бауэр Светлана Михайловна, д.ф.-м.н., профессор кафедры теоретической и прикладной механики, Санкт-Петербург

Венатовская Людмила Александровна, к.ф.-м.н., доцент кафедры теоретической и прикладной механики, Санкт-Петербург

Качанов Андрей Борисович, к.м.н., заведующий отделением рефракционной хирургии и контактной коррекции, врач-офтальмохирург высшей категории; доцент кафедры офтальмологии, Санкт-Петербург

Корников Владимир Васильевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры управления медико-биологическими системами, Санкт-Петербург

двумя тонкими, но более прочными слоями: боуеновой мембраной (боуеновой оболочкой) спереди и десцементовой мембраной сзади. Строма роговицы состоит из уплощенных пластинок (слоев коллагеновых фибрилл), наложенных друг на друга. Экспериментальные исследования показывают, что материал роговицы, а также материал склеры сильно анизотропный и неоднородный. Влияние многослойной структуры роговицы на напряженно-деформированное состояние корнеосклеральной оболочки глаза и измерение внутриглазного давления проанализировано в [3].

В настоящее время лазерная кераторефракционная хирургия считается одним из самых популярных видов операций по коррекции различных аномалий рефракции [1, 5–7]. С 2007 г. появилась новая технология «безлоскутной» хирургии роговицы, а именно технология рефракционной экстракции линтикулы (*ReLEx*®) через малый надрез (*SMILE*), которая заняла значительную нишу в современных кераторефракционных операциях [1, 4]. По данным Санкт-Петербургского филиала Национального медицинского исследовательского центра «Межотраслевой научно-технический комплекс "Микрохирургия глаза" имени академика С.Н. Федорова», более 85% кераторефракционных операций, выполненных в отделении рефракционной хирургии в 2017 г., составляли фемтосекундные лазерные операции, из них 82% – операции *SMILE* [4].

По мнению офтальмологов [4], существенным преимуществом метода *SMILE* перед ЛАСИК и ФРК является его безболезненность, безопасность, скорость и комфорт. В процедуре *SMILE* нет выраженного давления на глазное яблоко, как при ЛАСИК, и неприятных запахов, и звуков, характерных для этапа лазерной абляции роговицы, как при ФРК. Таким образом, *SMILE* – перспективный и современный способ коррекции миопии с быстрым восстановлением остроты зрения без коррекции, как при ЛАСИК, и отсутствием роговичного лоскута, как при операции ФРК.

В последних исследованиях широко обсуждаются потенциальные биомеханические преимущества *SMILE* по сравнению с ЛАСИК и ФРК из-за отсутствия лоскута [4, 8, 9]. В [8] отмечено большее биомеханическое воздействие вертикальных разрезов (перпендикулярно поверхности роговицы) по сравнению с горизонтальными разрезами (вдоль поверхности роговицы) при хирургических вмешательствах. Также упоминается, что боуенова мембрана и передние ламеллы стромы остаются неповрежденными после *SMILE*, тогда как при ЛАСИК и ФРК боуенова мембрана либо разрезается, либо соответственно удаляется. Если оставить боуенову мембрану неповрежденной, это может повысить биомеханическую стабильность роговицы после *SMILE* по сравнению с ЛАСИК и ФРК [8]. Последнее означает, что при математическом моделировании необходимо учитывать различия в лазерных методах коррекции и многослойную структуру роговицы.

В работе [10] сравнивается биомеханическое воздействие безлоскутных и лоскутных процедур у ряда пациентов, которым была проведена экстракция линтикулы через небольшой разрез на одном глазу и удаление фемтосекундной линтикулы с помощью лоскута в другом. Показано, что интрастромальные безлоскутные процедуры имеют меньшее влияние на механику коллагена передней стромы и приводят к меньшим смещениям и напряжениям в стромальном ложе, чем процедуры на основе лоскута на контралатеральных глазах.

В данной работе построены конечно-элементные модели различных процедур лазерной коррекции зрения: *SMILE*, ЛАСИК и ФРК. Оценивается изменение напряженно-деформированного состояния роговицы после хирургической коррекции миопии.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Корнеосклеральная оболочка глаза моделируется как сопряженные сферические сегменты с переменной толщиной, разными радиусами кривизны и разными упругими свойствами (рис. 1). Роговица моделируется многослойной оболочкой: первый (внешний) слой представляет собой эпителий, второй слой – боуменову мембрану, третий слой – строму, четвертый (внутренний) слой – десцеметову мембрану. Склера моделируется многослойным сферическим сегментом большего радиуса. Центральная толщина роговицы полагается 0,54 мм, толщина роговицы в зоне сопряжения со склерой – 1,0 мм, толщина склеры в зоне экватора – 0,6 мм. Материалы роговицы и склеры трансверсально-изотропны. Предполагается, что перед нагружением составная оболочка заполнена несжимаемой жидкостью с истинным давлением p_0 . Нелинейный анализ выполняется в системе конечно-элементного анализа *ANSYS Inc.* В силу симметрии выполняется двумерное (2D) моделирование с использованием конечных элементов *PLANE182*. Рассматривается осесимметричная задача с осью симметрии Y , ось X направлена по нормали к поверхности изотропии. В центральной части роговицы применяется условие симметрии, на нижней границе склеры запрещены смещения в вертикальном направлении. Выполняется нелинейное решение с использованием опции больших перемещений. Для критериев сходимости используется метод Ньютона–Рафсона.

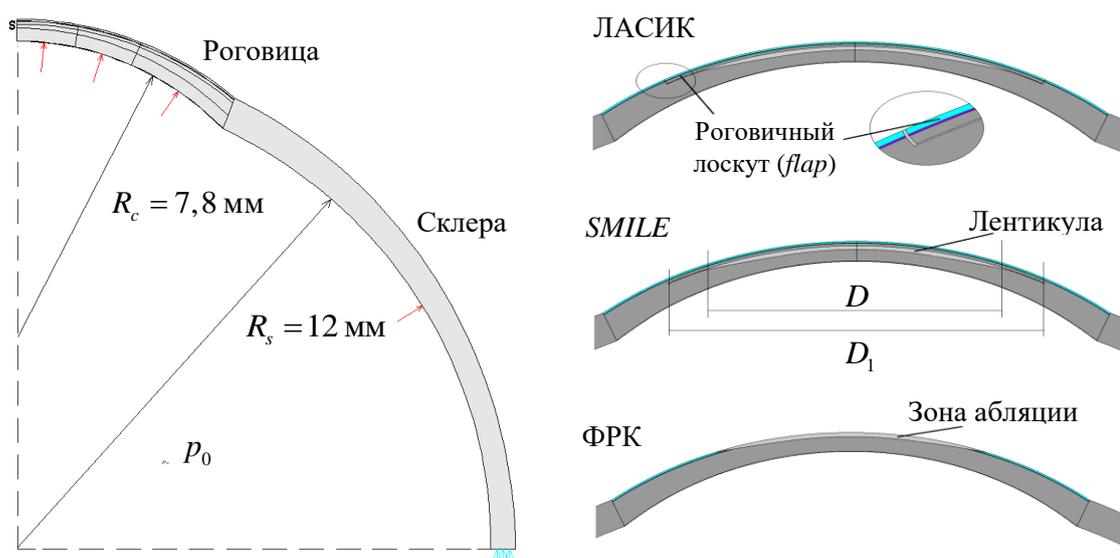


Рис. 1. Модель сопряженных оболочек переменной толщины (слева) и параметры операций ЛАСИК, SMILE, ФРК (справа)

Технология ЛАСИК заключается в выкраивании поверхностного лоскута роговицы с помощью фемтосекундного лазера и обработки стромы роговицы излучением эксимерного лазера, что называется абляцией роговицы. В случае формирования роговичного лоскута с помощью фемтосекундного лазера процедура называется Фемто-ЛАСИК. Перед операцией передние слои роговицы немного приподнимаются, после операции поверхностный лоскут возвращается на место. В результате такого воздействия в роговице появляется дополнительный слой (*flap*).

Процедура SMILE – это технология рефракционной экстракции лентикулы, при которой не выкраивается поверхностный лоскут роговицы, а формируется роговичный карман. Операция полностью выполняется фемтосекундным лазером внутри роговицы, не затрагивая ее поверхностные слои. В данной модели диаметр и толщина

роговичного кармана принимаются равными размерам роговичного лоскута при ЛАСИК, но при этом отсутствует срез в направлении толщины.

Фоторефрактерная кератэктомия (ФРК) – технология, при которой не вырезается поверхностный лоскут роговицы и не формируется роговичный карман, роговица сразу снаружи обрабатывается излучением эксимерного лазера. При данной операции требуется дополнительно удалять верхние слои роговицы, так как устойчивый рефракционный эффект достигается только при изменении геометрии стромы (основного слоя роговицы).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В наших моделях диаметр лентиккулы при операции SMILE и диаметр абляции при операциях ЛАСИК и ФРК являются сравнимыми параметрами, которые обуславливают рефракционный эффект лазерной коррекции зрения. Толщина лентиккулы при операции SMILE и максимальная толщина (глубина) абляции роговицы при операциях ЛАСИК и ФРК также являются сравнимыми параметрами.

Для представленных результатов приняты следующие значения параметров: диаметр лентиккулы в SMILE или зоны абляции в ЛАСИК и ФРК составляет 6,5 мм, толщина лентиккулы в SMILE или максимальная толщина (глубина) абляции в ЛАСИК или ФРК 100 микрон, толщина крышки в SMILE или роговичного лоскута в ЛАСИК 120 микрон, диаметр крышки в SMILE или роговичного лоскута в ЛАСИК 7,9 мм. Слой, который представляет собой лентиккулу, зону абляции или разрез роговицы, моделируется одним материалом с одинаковыми упругими характеристиками (табл. 1).

Таблица 1

Сравниваемые параметры в моделях ЛАСИК, SMILE и ФРК

Сравниваемые параметры	ЛАСИК	SMILE	ФРК
Толщина роговичного лоскута, мкм	120,0	–	–
Толщина роговичного клапана, мкм	–	120,0	–
Толщина лентиккулы, мкм	–	100,0	–
Толщина (глубина) абляции в центре, мкм	100	–	100
Диаметр лентиккулы, мм	–	6,5	–
Диаметр абляции, мм	6,5	–	6,5
Диаметр роговичного кармана, мм	–	7,9	–
Диаметр роговичного лоскута, мм	7,9	–	7,9

Толщина и модули упругости основных слоев роговицы, склеры и зоны абляции/лентиккулы показаны в табл. 2. Модули упругости каждого слоя роговицы в нормальном направлении E' взяты в 20 раз меньше, чем в тангенциальном направлении E [2]. Коэффициенты Пуассона роговицы, склеры и слоя абляции на поверхности изотропии приняты $\nu = 0,49$, в направлении толщины $\nu' = 0,01$; модули сдвига $G = E/[2(1 + \nu)]$ и $G' = G/2$.

На рис. 2 показано напряженно-деформированное состояние роговицы до операции и после коррекции, выполненной методами SMILE, ЛАСИК и ФРК. Внутреннее давление составляет 15 мм рт. ст. Численные результаты представлены в табл. 3.

Таблица 2

Параметры роговицы, склеры и слоя абляции/лентикулы

Параметр	Роговица				Склера	Слой абляции/лентикула
	Эпителий	Боуменова оболочка	Строма	Десцементова оболочка		
h , мм	0,04	0,012	0,5	0,01	0,6	0,1
E , МПа	0,06	0,6	0,3	0,9	15,0	0,0001
E' , МПа	0,003	0,03	0,015	0,045	1,5	0,001

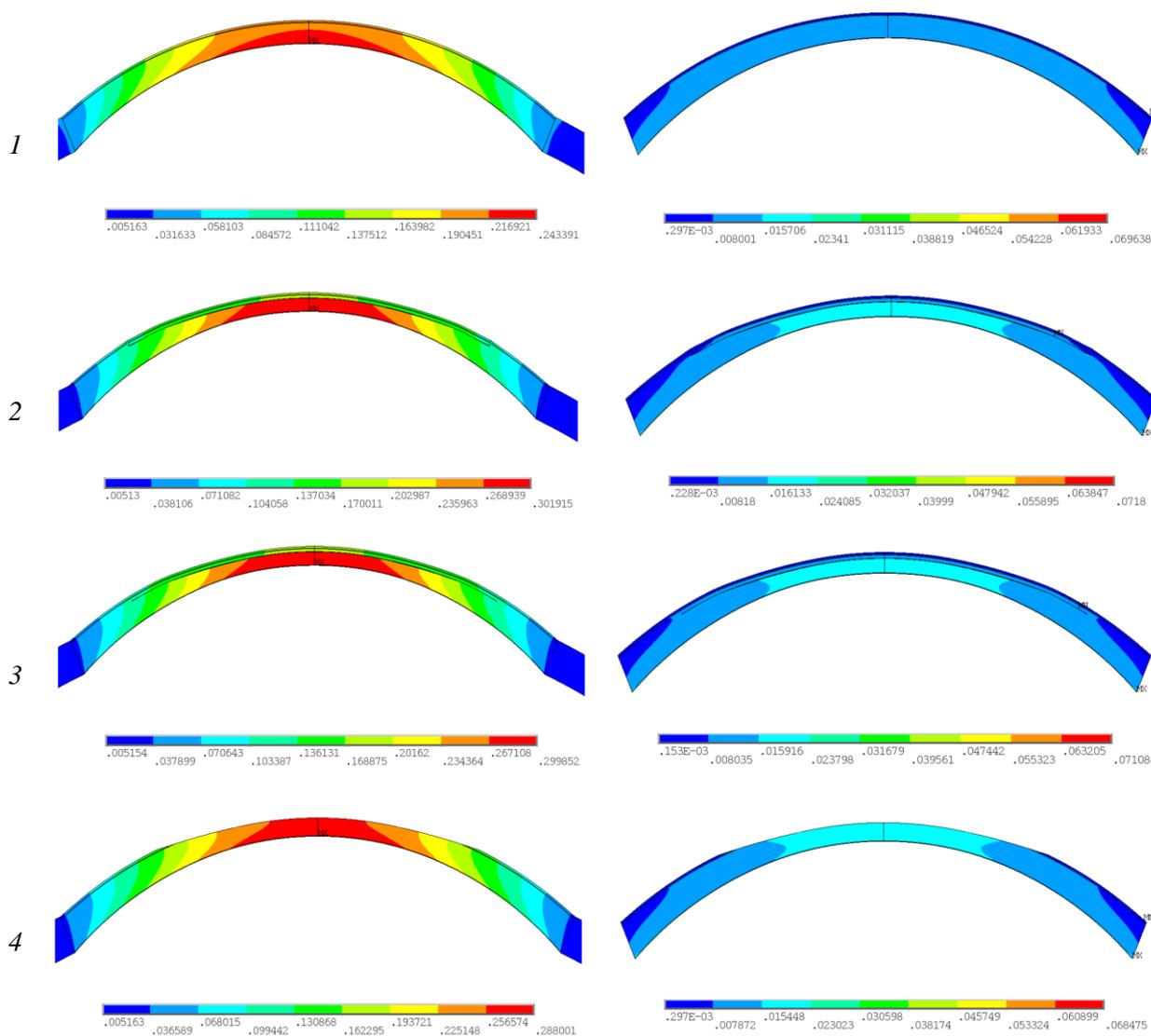


Рис. 2. Перемещения (а) и распределение напряжения по Мизесу (б): 1 – до лазерной операции; 2 – после ЛАСИК; 3 – после SMILE; 4 – после ФРК

На рис. 3 показан фрагмент роговицы после операции ЛАСИК. Видно, что максимальные напряжения возникают в боуменовой и десцементовой мембранах. Этот эффект наблюдается как в предоперационном состоянии, так и после лазерной коррекции.

Таблица 3

Численные результаты роговицы, склеры и слоя абляции/лентиккулы

Тип лазерной коррекции	Перемещения, мм	Напряжения, МПа
До коррекции	0,2434	0,0696
ЛАСИК	0,3019	0,0718
<i>SMILE</i>	0,2999	0,0711
ФРК	0,2880	0,0685

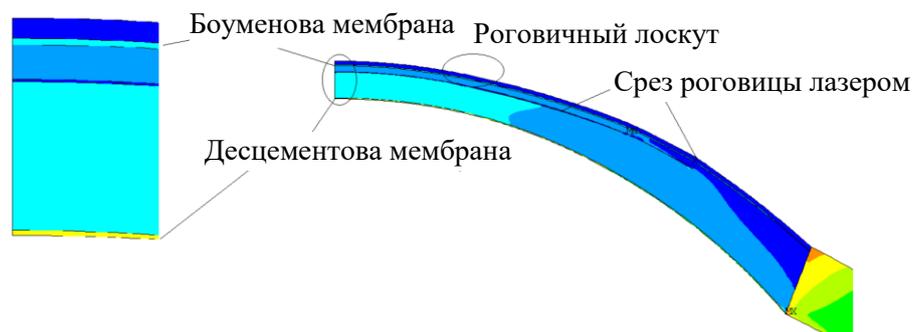


Рис. 3. Распределение напряжения по Мизесу в основных слоях роговицы после лазерной коррекции ЛАСИК

ВЫВОДЫ

Численные результаты показали, что при одинаковых параметрах напряжения в роговице, а также перемещения центральной части роговицы наибольшие в модели ЛАСИК, затем в модели *SMILE*, затем в ФРК. При этом склера оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние составной оболочки. Проведение операции в более глубоких внутренних слоях стромы, что характерно для *SMILE*, приводит к большим смещениям центральной части роговицы, т.е. позволяет корректировать большие ошибки зрения. При равных значениях напряжений *SMILE* позволяет удалять больший слой роговичной ткани, чем при ЛАСИК, и сильнее изменять геометрию роговицы. Учет многослойной структуры роговицы показал, что наибольшие напряжения возникают в боуеновой и десцеметовой оболочках. В моделях ЛАСИК и ФРК боуенова оболочка или срезается, или подвергается воздействию лазера, в то время как при *SMILE* данная оболочка сохраняется целой.

SMILE и ФРК можно рассматривать эквивалентными с точки зрения биомеханической стабильности. Преимуществом операции *SMILE* является возможность коррекции больших ошибок зрения по сравнению с ФРК при одинаковых входных данных операций.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета «Обсерватория экологической безопасности».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балашевич Л.И. Рефракционная хирургия. – СПб.: Издательский дом СПб МАПО, 2002. – 198 с.
2. Иомдина Е.Н., Бауэр С.М., Котляр К.Е. Биомеханика глаза: теоретические аспекты и клинические приложения. – М.: Реал Тайм, 2015. – 208 с.
3. Карамшина Л.А. Механические модели аппланационной тонометрии с учетом многослойности роговицы // Российский журнал биомеханики. – 2011. – Т. 15, № 3. – С. 37–44.
4. Качанов А.Б., Никулин С.А. Технология ReLEx® SMILE у лиц призывного возраста // Клиническая патофизиология. – 2009. – № 1. – С. 30–33.
5. Alastrué V., Calvo B., Peña E., Doblaré M. Biomechanical modelling of refractive corneal surgery // J. Biomech. Eng. – 2006. – Vol. 128, no. 1. – P. 150–160.
6. Fernandez D.C., Niazzy A.M., Kurtz R.M., Djotyan G.P., Juhasz T. A finite element model for ultrafast laserlamellar keratoplasty // Ann. Biomed Eng. – 2006. – Vol. 34, no. 1. – P. 168–183.
7. Pinsky P.M., Datye D.V. A microstructurally-based finite element model of the incised human cornea // J. Biomech. – 1991. – Vol. 24, no. 10. – P. 907–922.
8. Reinstein, D.Z., Archer, T.J., Gobbe M. The Key Characteristics of Corneal Refractive Surgery: Biomechanics, Spherical Aberration, and Corneal Sensitivity After SMILE. In: Sekundo W. (Ed.). Small incision lenticule extraction (SMILE). – Cham – Heidelberg – New York – Dordrecht – London: Springer, 2015. – P. 123–142. DOI: 10.1007/978-3-319-18530-9
9. Sekundo W., Kunert K.S., Blum M. Small incision corneal refractive surgery using the small incision lenticule extraction (SMILE) procedure for the correction of myopia and myopic astigmatism: results of a 6 month prospective study // Br. J. Ophthalmol. – 2011. – Vol. 95, no. 3. – P. 335–339. DOI: 10.1136/bjo.2009.174284
10. Seven I., Vahdati A., Pedersen I.B., Vestergaard A., Hjortdal J., Roberts C.J., Dupps W.J. Jr. Contralateral eye comparison of SMILE and flap-based corneal refractive surgery: computational analysis of biomechanical impact // J. Refract. Surg. – 2017. – Vol. 33, no. 7. – P. 444–453. DOI: 10.3928/1081597X-20170504-01

MATHEMATICAL MODELS OF LASER CORRECTION OF MYOPIA BY LASIK, SMILE AND PRK METHODS

S.M. Bauer, L.A. Venatovskaya, A.B. Kachanov, V.V. Kornikov (Saint-Petersburg, Russian Federation)

The stress-strain state of the human eye, which cornea in its apex is weakened after myopia surgical correction, is studied. The elastic system “cornea–sclera” is presented as two joint transversely isotropic spherical segments with tapered thickness, different radii of curvature and biomechanical properties. Cornea is modeled as multilayer shell. The simulated eye shell is loaded with internal pressure. Mathematical models of three different laser vision correction surgeries: small incision lenticule extraction (SMILE), laser in situ keratomileusis (LASIK) and photorefractive keratectomy (PRK), are developed in the engineering simulation software ANSYS Inc. The diameter and thickness of the lenticular in SMILE, the diameter of the ablation zone and the maximum thickness (depth) of the corneal ablation in LASIK and PRK define optical surgery areas and are considered as comparable parameters. Finite element simulation shows that after LASIK vision correction the apex of the cornea has a greater displacement and the stress increase greater in the stroma than after SMILE and PRK.

Key words: intraocular pressure, adjoint transversely isotropic shells, laser vision correction surgeries, LASIK, SMILE, photorefractive keratectomy (PRK).

Получено 9 августа 2021