

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

МОРЩИНИНА Диана Алексеевна

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ  
ИНТРАОКУЛЯРНЫХ ЛИНЗ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2010

Работа выполнена на кафедре вычислительных методов механики деформируемого тела факультета прикладной математики – процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор ДАЛЬ Юрий Михайлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор ФИЛИППОВ Сергей Борисович  
(Санкт-Петербургский государственный  
университет)

доктор технических наук,  
профессор МЕЛЬНИКОВ Борис Евгеньевич  
(Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет)

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный  
горный университет

Защита состоится “ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2010 г. в \_\_\_ часов на заседании совета Д 212.232.30 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Петродворец, Университетский пр., 28, математико-механический факультет, ауд. 405.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9.

Автореферат разослан “ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Кустова Е. В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** В настоящее время концепции механики деформируемого твердого тела широко применяется в различных областях медицины, в том числе и в офтальмологии. Создание математических моделей глазных болезней, согласованных с законами биомеханики, физиологии и биохимии, позволяет, в ряде случаев, находить наиболее эффективные способы их лечения.

Исследования Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) свидетельствуют о том, что ныне в мире насчитывается свыше 45 миллионов слепых и 135 миллионов людей с серьезными дефектами зрения. При этом основной причиной потери зрения является катаракта.

На сегодняшний день существует единственный (хирургический) способ лечения данного заболевания, который заключается в замене помутневшего естественного хрусталика прозрачным искусственным – так называемой, интраокулярной линзой (ИОЛ).

ИОЛ состоит из двух частей: оптической, представляющей собой центральную линзу, которая фокусирует изображение на сетчатку, и опорных элементов, называемых гаптикой.

В диссертационной работе проводится исследование современных интраокулярных линз с четырьмя и двумя опорными элементами (С-образная гаптика). На данный момент именно они, в основном, используются в офтальмологической практике.

С точки зрения механики деформируемого тела, оптическую часть ИОЛ можно считать тонким изотропным диском постоянной толщины. В свою очередь гаптику интраокулярной линзы с четырьмя опорными элементами естественно рассматривать как совокупность четырех плоских рам; в случае С-образной гаптики – как два тонких криволинейных стержня, жестко заделанных на контуре диска и абсолютно свободных на другом конце.

После установки ИОЛ в капсуле хрусталика её опорные элементы оказываются изогнутыми. В местах их соединения с оптическим диском возникают реакции взаимодействия – сосредоточенные силы и моменты. Следовательно, оценка напряженно-деформированного состояния интраокулярной линзы состоит в определении полей напряжений и перемещений в диске и в анализе прогибов и изгибающих моментов в опорных элементах. Следует особо подчеркнуть, что в хирургической практике неоднократно отмечались случаи отрыва опорных элементов от контура оптического диска.

Таким образом, исследование напряженно-деформированного состояния интраокулярных линз является актуальной проблемой, представляющей интерес как для механики деформируемого твердого тела, так и для офтальмологической практики.

**Цель работы** состоит в построении математических моделей, позволяющих оценить прочность двух типов искусственных хрусталиков, наиболее часто используемых при операциях по удалению катаракты.

При анализе напряженно-деформированного состояния современных интраокулярных линз с четырьмя и двумя опорными элементами были поставлены следующие задачи:

1. Определить поля упругих напряжений и перемещений, возникающие в оптическом диске под действием сосредоточенных сил и моментов;
2. Решить геометрически нелинейную задачу о плоском изгибе криволинейного стержня, жестко защемленного на одном конце и нагруженного сосредоточенной силой на другом;
3. Проанализировать напряженно-деформированное состояние гаптики ИОЛ с четырьмя опорными элементами;
4. Провести экспериментальные исследования прочности интраокулярных линз с С-образной гаптикой.

**Методы исследования.** При анализе поставленных задач использовались методы, предложенные в работах ученых-механиков: Г. В. Колосова,

Н. И. Мухелишвили, В. В. Новожилова, Хана Х., С. Д. Пономарева, В. Л. Бидермана, К. К. Лихарева, В. М. Макушина, Н. Н. Малинина, В. И. Феодосьева и других авторов.

В частности, методами теории функций комплексного переменного найдено точное аналитическое решение плоской задачи теории упругости для диска, на контуре которого действуют сосредоточенные силы и моменты.

На основе нелинейной теории изгиба тонких криволинейных стержней проведено исследование напряженно-деформированного состояния опорных элементов интраокулярных линз с С-образной гаптикой.

Соотношения строительной механики стержневых систем использованы при анализе распределения упругих напряжений в гаптке ИОЛ с четырьмя опорными элементами.

Проведены специальные эксперименты по оценке прочности узла соединения оптического диска и опорного элемента.

**Научная новизна.** Автором получены следующие новые результаты:

1. Определены потенциалы Г. В. Колосова  $\Phi(z)$  и  $\Psi(z)$  для диска, нагруженного системой самоуравновешенных моментов;
2. Выведены точные аналитические выражения для компонент напряжений и перемещений в диске, на контуре которого действуют сосредоточенные нагрузки (в декартовой и в полярной системе координат);
3. Составлены компьютерные программы и произведены вычисления компонент тензора напряжений и вектора перемещений в диске ИОЛ;
4. Получено аналитическое решение геометрически нелинейной задачи о плоском изгибе С-образной гаптики интраокулярной линзы;
5. Проведены эксперименты по определению прочности опорных элементов искусственного хрусталика.

**Достоверность** основных научных положений основана на строгой физической постановке соответствующих задач и корректных математических методах, использованных при их решении. В частных случаях расче-

ты по выведенным теоретическим зависимостям были сопоставлены с решениями других авторов. Экспериментальные результаты подтвердили достоверность основных положений диссертационной работы.

#### **Результаты, выносимые на защиту:**

1. Решение плоской задачи линейной теории упругости для диска, на контуре которого действует самоуравновешенная система сосредоточенных сил и моментов.

2. Аналитическое решение геометрически нелинейной задачи о плоском изгибе тонкого криволинейного стержня, заделанного на одном конце и нагруженного сосредоточенной силой на другом.

3. Анализ напряженно-деформированного состояния гаптики ИОЛ с четырьмя опорными элементами.

4. Результаты экспериментальных исследований прочности интраокулярных линз.

**Практическая ценность.** Полученные результаты могут применяться на практике для оценки прочности и жесткости современных интраокулярных линз. Разработанные в диссертации методы решения плоской задачи теории упругости для диска используются в учебном процессе на факультете прикладной математики – процессов управления (в курсе лекций «Теория функций комплексного переменного»).

**Апробация работы.** Отдельные результаты работы докладывались на семинарах кафедры вычислительных методов механики деформируемого тела (2007 – 2009 гг.), научных конференциях студентов и аспирантов «Процессы управления и устойчивость» факультета прикладной математики – процессов управления СПбГУ (2007 г., 2009 г.), городском семинаре «Компьютерные методы в механике сплошной среды» (г. Санкт-Петербург, 2007 г.), конференции «Физика конденсированного состояния» (г. Гродно, Республика Беларусь, 2008 г.), Международных конференциях «Актуальные проблемы прочности» (г. Нижний Новгород, 2008 г., г. Киев 2010 г.), Санкт-Петербургских чтениях по проблемам прочности (2010 г.).

В целом диссертация докладывалась на семинарах кафедры вычислительных методов механики деформируемого тела СПбГУ, кафедры высшей математики Санкт-Петербургского государственного горного университета, кафедры сопротивления материалов СПбГТУ (Политехнический университет).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано девять работ, из них две статьи [1, 2] в журналах, рекомендованных ВАК Российской Федерации. В работе [1], написанной в соавторстве, автору принадлежит вывод формул для напряжений и перемещений, проведение численных расчетов и составление соответствующих компьютерных программ. Соавтору Ю. М. Далю принадлежит общая постановка задачи.

**Поддержка.** Исследования диссертанта на различных этапах работы поддерживались грантами РФФИ № 06-01-00171-а, № 08-01-00394-а, № 10-01-00093-а, грантом Правительства Санкт-Петербурга (№ 2.2/30-04/008 проект «Напряженно-деформированное состояние интраокулярных линз»), НИР факультета прикладной математики – процессов управления СПбГУ «Нелинейная механика твердого деформируемого тела».

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, двух приложений, заключения и списка литературы, насчитывающего 53 наименования. Общий объем диссертации 121 стр., общее количество рисунков и графиков – 67, таблиц – 6.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы работы, описываются цели и методы исследования, а также основные полученные результаты.

**В первой главе** содержатся медицинские аспекты рассматриваемой проблемы. Кратко излагаются некоторые анатомические особенности глазного яблока. Описываются причины возникновения и основные виды катаракты, а также особенности её хирургической операции. Приводится

история происхождения интраокулярных линз, их основные типы и свойства.

**Во второй главе** исследуется напряженно-деформированное состояние оптической части интраокулярной линзы с четырьмя и двумя опорными элементами. Методами теории функций комплексного переменного решается плоская задача линейной теории упругости для диска, на контуре которого действуют самоуравновешенные сосредоточенные нагрузки. При этом компоненты тензора напряжений  $(\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy})$ , вектора перемещений  $(u, v)$  и угол поворота  $\omega$  в произвольной точке диска  $z = x + iy$  ( $|z| \leq R$ ) определяются формулами Г. В. Колосова:

$$\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + i \frac{E}{1-\nu^2} \omega = 4\Phi(z), \quad \sigma_{yy} - \sigma_{xx} + 2i\sigma_{xy} = 2 \left[ \bar{z}\Phi'(z) + \Psi(z) \right], \quad (1)$$

$$\frac{E}{1+\nu}(u + iv) = \kappa \int \Phi(z) dz - z\overline{\Phi(z)} - \int \overline{\Psi(z)} d\bar{z}, \quad \left( \kappa = \frac{3-\nu}{1+\nu} = const \right). \quad (2)$$

Здесь  $E$  и  $\nu$  – соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала, из которого изготовлен диск.

В *первом параграфе* рассматривается изотропный упругий диск радиуса  $R$ , на контуре которого действуют нормальные сосредоточенные силы  $N$ , приложенные в точках

$$z_1 = R e^{i\alpha_1}, \quad z_2 = R e^{i\alpha_2}, \quad z_3 = -R e^{-i\alpha_2} = -\bar{z}_2, \quad z_4 = -R e^{-i\alpha_1} = -\bar{z}_1, \quad z_5 = -R e^{i\alpha_1} = -z_1, \\ z_6 = -R e^{i\alpha_2} = -z_2, \quad z_7 = R e^{-i\alpha_2} = \bar{z}_2, \quad z_8 = R e^{-i\alpha_1} = \bar{z}_1.$$

При этом функции  $\Phi(z)$  и  $\Psi(z)$  оказываются равными

$$\Phi(z) = -\frac{N}{\pi R} \left\{ \frac{z_1^2}{z_1^2 - z^2} + \frac{z_2^2}{z_2^2 - z^2} + \frac{(\bar{z}_1)^2}{(\bar{z}_1)^2 - z^2} + \frac{(\bar{z}_2)^2}{(\bar{z}_2)^2 - z^2} - 2 \right\}, \\ \Psi(z) = \frac{2NR}{\pi} \left\{ \frac{z_1^2}{(z_1^2 - z^2)^2} + \frac{z_2^2}{(z_2^2 - z^2)^2} + \frac{(\bar{z}_1)^2}{((\bar{z}_1)^2 - z^2)^2} + \frac{(\bar{z}_2)^2}{((\bar{z}_2)^2 - z^2)^2} \right\}. \quad (3)$$

Внося соотношения (3) в зависимости (1), (2) после осуществления необходимых преобразований, получаем выражения для компонент упру-

гих напряжений и перемещений (они приведены в диссертации на стр. 33 – 36).

Во *втором параграфе* решается задача для диска, на контуре которого в точках  $z_1 = R e^{i\alpha_1}$ ,  $z_2 = R e^{i\alpha_2}$ ,  $z_3 = -R e^{-i\alpha_2} = -\bar{z}_2$ ,  $z_4 = -R e^{-i\alpha_1} = -\bar{z}_1$ ,  $z_5 = -R e^{i\alpha_1} = -z_1$ ,  $z_6 = -R e^{i\alpha_2} = -z_2$ ,  $z_7 = R e^{-i\alpha_2} = \bar{z}_2$ ,  $z_8 = R e^{-i\alpha_1} = \bar{z}_1$  действуют сосредоточенные моменты  $M$ .

В данном случае окончательные формулы для функций  $\Phi(z)$  и  $\Psi(z)$  имеют вид:

$$\begin{aligned} \Phi(z) = & -\frac{Mi}{2\pi} \left[ \frac{e^{2i\alpha_1}}{(z_1 - z)^2} + \frac{e^{2i\alpha_1}}{(z_1 + z)^2} - \frac{e^{2i\alpha_2}}{(z_2 - z)^2} - \frac{e^{2i\alpha_2}}{(z_2 + z)^2} - \right. \\ & \left. - \frac{e^{-2i\alpha_1}}{(\bar{z}_1 - z)^2} - \frac{e^{-2i\alpha_1}}{(\bar{z}_1 + z)^2} + \frac{e^{-2i\alpha_2}}{(\bar{z}_2 - z)^2} + \frac{e^{-2i\alpha_2}}{(\bar{z}_2 + z)^2} \right], \\ \Psi(z) = & \frac{Mi}{2\pi} \left[ \frac{1}{(z_1 - z)^2} + \frac{1}{(z_1 + z)^2} + \frac{3z_1^2 - 4z_1z + z^2}{(z_1 - z)^4} + \frac{3z_1^2 + 4z_1z + z^2}{(z_1 + z)^4} - \right. \\ & - \frac{1}{(z_2 - z)^2} - \frac{1}{(z_2 + z)^2} - \frac{3z_2^2 - 4z_2z + z^2}{(z_2 - z)^4} - \frac{3z_2^2 + 4z_2z + z^2}{(z_2 + z)^4} - \\ & - \frac{1}{(\bar{z}_1 - z)^2} - \frac{1}{(\bar{z}_1 + z)^2} - \frac{3\bar{z}_1^2 - 4\bar{z}_1z + z^2}{(\bar{z}_1 - z)^4} - \frac{3\bar{z}_1^2 + 4\bar{z}_1z + z^2}{(\bar{z}_1 + z)^4} + \\ & \left. + \frac{1}{(\bar{z}_2 - z)^2} + \frac{1}{(\bar{z}_2 + z)^2} + \frac{3\bar{z}_2^2 - 4\bar{z}_2z + z^2}{(\bar{z}_2 - z)^4} + \frac{3\bar{z}_2^2 + 4\bar{z}_2z + z^2}{(\bar{z}_2 + z)^4} \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

В *третьем параграфе* исследуются (в декартовой системе координат) особенности напряженно-деформированного состояния диска, нагруженного двумя самоуравновешенными сосредоточенными силами  $P$ , приложенными в точках  $z_1 = R$ ,  $z_2 = -R$ . Как показано в диссертации, функции  $\Phi(z)$  и  $\Psi(z)$ , входящие в формулы (1), (2), имеют при этом следующий вид:

$$\Phi(z) = -\frac{P}{2\pi} \left\{ \frac{2R}{R^2 - z^2} - \frac{1}{R} \right\}, \quad \Psi(z) = \frac{P}{2\pi} \left\{ \frac{2R}{R^2 - z^2} + \frac{2R(R^2 + z^2)}{(R^2 - z^2)^2} \right\}. \quad (5)$$

Согласно (1), (2), в диссертации вычислены компоненты напряжения  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{xy}$ , угол поворота  $\omega$  и проекции перемещения  $u$  (на ось  $x$ ) и  $v$  (на ось  $y$ ).

На рис. 1 кривыми (1, 2, 3, 4) представлен график безразмерных напряжений  $\sigma_{xx}^0 = \frac{\pi R}{2P} \sigma_{xx}$  при  $x/R = (0, 0.25, 0.5, 0.75)$ .

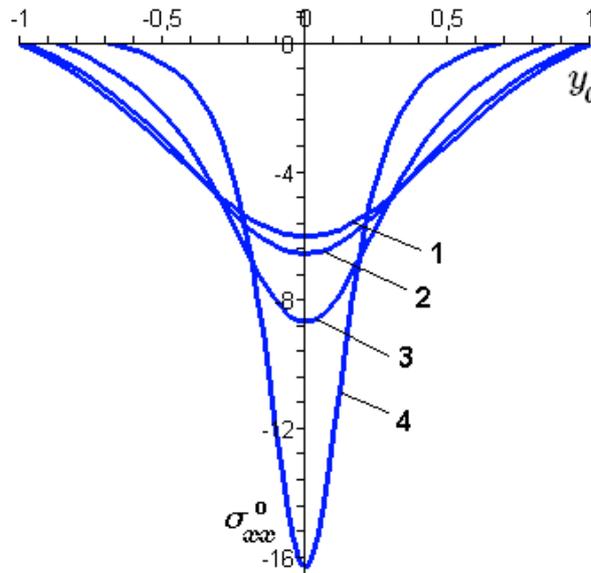


Рис. 1.

Распределение напряжений  $\sigma_{xx}^0$  в диске,  
загруженном двумя сосредоточенными силами.

В *четвертом параграфе* анализируется (в декартовой системе координат) напряженно-деформированное состояние диска, контур которого загружен двумя самоуравновешенными сосредоточенными моментами  $M$ , приложенными в точках  $z_1 = R$ ,  $z_2 = -R$ . Функции  $\Phi(z)$  и  $\Psi(z)$  для такой нагрузки определяются формулами:

$$\Phi(z) = \frac{Mi}{2\pi} \left\{ \frac{1}{(R+z)^2} - \frac{1}{(R-z)^2} \right\},$$

$$\Psi(z) = \frac{Mi}{2\pi} \left\{ \frac{1}{(R-z)^2} - \frac{1}{(R+z)^2} + \frac{3R^2 - 4Rz + z^2}{(R-z)^4} - \frac{3R^2 + 4Rz + z^2}{(R+z)^4} \right\}. \quad (6)$$

На основе зависимостей (1), (2), (6) были вычислены компоненты напряжения, перемещения и угол поворота.

Решение задач для диска, на контуре которого действует две сосредоточенные силы или два сосредоточенных момента, в полярной системе координат содержится в *пятом параграфе* настоящей главы.

В *шестом параграфе* проводится сопоставление полученных результатов для диска с аналогичными решениями для полуплоскости. Для диска и полуплоскости, на которые действуют сосредоточенные силы и моменты, построены графики нормальных напряжений, позволяющие определить локальные области около точки приложения сосредоточенной нагрузки, где напряжения, возникающие в диске, можно вычислять по соответствующим формулам для полуплоскости.

**Третья глава** посвящена анализу напряженно-деформированного состояния гаптики интраокулярных линз с двумя и четырьмя опорными элементами.

В первом случае исследование проводится с позиции нелинейной теории изгиба тонких криволинейных стержней, основные соотношения которой приведены в §1. Нелинейное дифференциальное уравнение изгиба сильно изогнутого тонкого стержня  $OL$  имеет вид:

$$\frac{d^2\zeta}{ds^2} = -\frac{P}{E^*J} \sin \zeta, \quad (7)$$

где  $\zeta$  – угол, который составляет касательная, проведенная в некоторой точке стержня, с осью  $x'$  подвижной системы координат;  $s$  – длина дуги, отсчитываемая от начала координат к  $L$ ;  $J$  – момент инерции сечения стержня;  $E^* = E/(1-\nu^2)$ .

Введя безразмерный параметр  $\beta = l\sqrt{\frac{P}{E^*J}}$ , после однократного интегрирования получаем:

$$l^2 \left( \frac{d\zeta}{ds} \right)^2 = 4\beta^2 \left( C_1 - \sin^2 \frac{\zeta}{2} \right), \quad (C_1 = const) \quad (8)$$

Во *втором параграфе* решается задача о плоском изгибе криволинейного стержня  $OL$  длиной  $l$ , жестко закрепленного на одном конце и нагруженного сосредоточенной силой  $P$  на другом (рис. 2).

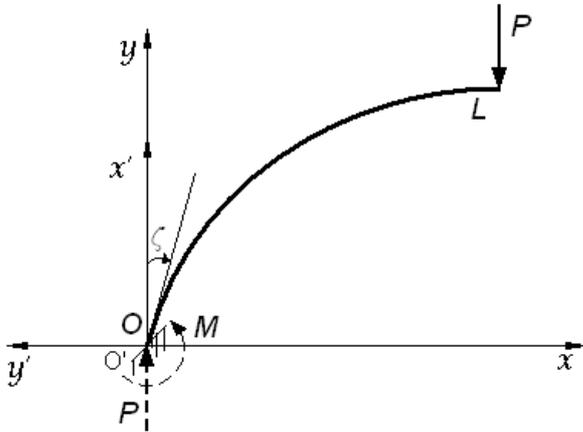


Рис. 2.

Криволинейный стержень, нагруженный сосредоточенной силой  $P$ .

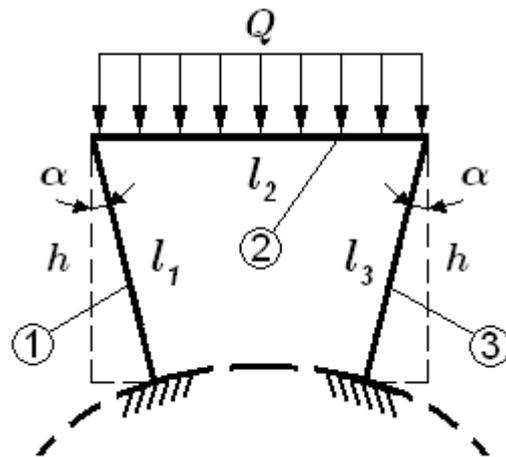


Рис. 3.

Плоская рама с неподвижными узлами.

Предполагается, что в первоначальном (недеформированном) состоянии стержень имел форму дуги окружности радиуса  $R_0$  (это предположение подтверждается результатами специальных экспериментов). Рассматривается перегибная и бесперегибная форма равновесия упругой линии стержня. Методом Е. П. Попова в эллиптических интегралах находится выражение для изгибающего момента в точке соединения опорного элемента с оптическим диском.

В случае перегибного равновесия изгибающий момент  $M$  в точке соединения гаптики с диском определяется по формуле:

$$M = -\frac{\sqrt{2}}{\beta} Pl - \frac{E^* J}{R_0} = -\frac{\sqrt{2}}{\beta} Pl - \frac{EJ}{(1-\nu^2)R_0}.$$

В случае бесперегибного равновесия

$$M = \frac{2}{k\beta} Pl - \frac{E^* J}{R_0} = \frac{2}{k\beta} Pl - \frac{EJ}{(1-\nu^2)R_0},$$

где  $k$  – параметр эллиптического интеграла, определяемый из уравнения, приведенного в диссертации.

В *третьем параграфе* содержится анализ напряженно-деформированного состояния гаптики ИОЛ с четырьмя опорными элементами. Здесь каждый из опорных элементов рассматривается как плоская трапециевидная рама, составленная из трех прямых стержней ①, ②, ③ длиной  $l_1 = l_3 = \frac{h}{\cos \alpha}$ ,  $l_2 = \frac{sh}{\cos \alpha}$ ,  $s = const$  и моментом инерции поперечного сечения  $I_1 = I_2 = I_3 = I$ , с неподвижными узлами и жестко заделанными опорами (рис. 3). Предполагается, что на второй стержень действует равномерно распределенная нагрузка  $Q = ql_2 = \frac{qsh}{\cos \alpha}$ .

На основе соотношений строительной механики стержневых систем определены изгибающие моменты, максимальные напряжения и прогибы стержней, входящих в состав рамы. Для полученных выражений построены безразмерные графики в зависимости от величины угла  $\alpha$  и коэффициента  $s = l_2 / l_1$ .

В *четвертом параграфе* проводится сопоставление жесткости гаптик интраокулярных линз с двумя и четырьмя опорными элементами.

**В четвертой главе** содержатся результаты экспериментальных исследований интраокулярных линз с С-образной гаптикой.

*Первый параграф* посвящен эксперименту по определению деформации опорных элементов в зависимости от нагрузки. Интраокулярная линза фиксировалась на миллиметровой бумаге и располагалась вертикально, после чего к опорному элементу прикладывалась постепенно возрастающая нагрузка. На каждом этапе нагружения определялся радиус кривизны, включающий три составляющие  $R_1, R_2, R_3$ . На основе полученных данных построены графики изменения деформации гаптики в зависимости от нагрузки.

Во *втором параграфе* приводится сравнительный качественный анализ прочности составных и монолитных интраокулярных линз с С-образной гаптикой. Для этого искусственный хрусталик фиксировался в центре круга, разбитого на сектора с углом раствора  $\varphi = 5^\circ$ . После чего с помощью жесткого стержня осуществлялась деформация гаптики по контуру оптического диска.

**В приложении I** представлены два различных способа получения комплексных функций  $\Phi(z)$  и  $\Psi(z)$  в случае диска, загруженного на контуре сосредоточенными моментами.

**В приложении II** содержатся выражения для компонент перемещения в полярных координатах для диска, на контуре которого действуют два сосредоточенных момента.

**В заключении** приводятся основные результаты работы, которые состоят в следующем:

1. Методами теории функций комплексного переменного найдено точное аналитическое решение плоской задачи линейной теории упругости (в декартовой и полярной системе координат) для оптического диска ИОЛ, загруженного на контуре самоуравновешенными сосредоточенными силами.
2. Выведены формулы для комплексных потенциалов Г. В. Колосова  $\Phi(z)$  и  $\Psi(z)$  в случае, когда на контуре диска приложена система самоуравновешенных сосредоточенных моментов.
3. Решения, полученные для оптического диска, загруженного двумя сосредоточенными силами и моментами, сопоставлены с аналогичными результатами для полуплоскости. На основе построенных графиков и приведенных таблиц выявлены границы совпадения значений нормальных напряжений, возникающих в диске и полуплоскости.
4. С помощью соотношений строительной механики стержневых систем произведена оценка напряженно-деформированного состояния гаптики ИОЛ с четырьмя опорными элементами, представимой в виде совокупно-

сти четырех плоских трапециевидных рам. Выведены формулы и построены соответствующие графики для напряжений и прогибов стержней, входящих в состав этих рам. Полученные результаты позволяют утверждать, что оптимальной конструкцией для данного типа опорных элементов является П-образная рама.

5. Выполнена экспериментальная оценка деформированной конфигурации опорных элементов интраокулярной линзы с С-образной гаптикой. Построены графики изменения деформации этих элементов в зависимости от нагрузки.

6. Проведены экспериментальные исследования по определению прочности составных и монолитных интраокулярных линз. Установлено, что, в отличие от монолитных искусственных хрусталиков, у составных ИОЛ не происходит разрушения опорных элементов после многократного нагружения.

7. Сравнительный анализ двух типов интраокулярных линз свидетельствует о том, что жесткость гаптики ИОЛ с четырьмя опорными элементами существенно выше жесткости опорных элементов искусственного хрусталика с С-образной гаптикой.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:**

1. Даль Ю. М., Морщанина Д. А. О напряженно-деформированном состоянии интраокулярной линзы (ИОЛ) // Вестник С.-Петербур. ун-та. Сер. 1: Математика, механика, астрономия. 2008. Вып. 4. С. 118–124.

2. Морщанина Д. А. Математические модели интраокулярных линз // Вестник С.-Петербур. ун-та. Сер. 10: Прикладная математика, информатика, процессы управления. 2009. Вып. 4. С. 167–172.

### **Другие публикации:**

3. Морщинина Д. А. Поле упругих напряжений и перемещений в интраокулярных линзах (ИОЛ) // Труды семинара «Компьютерные методы в механике сплошной среды». Изд-во С.-Петерб. ун-та. 2007–2008. С. 84–101.
4. Морщинина Д. А. О напряжениях и перемещениях в интраокулярных линзах (ИОЛ) // Сборник докладов научной конференции студентов и аспирантов Гродненского государственного университета. Гродно, 2008. С. 80–81.
5. Морщинина Д. А. Плоская задача теории упругости для кругового диска, нагруженного сосредоточенными самоуравновешенными моментами // Материалы конференции «Актуальные проблемы прочности», Нижний Новгород, 2008, ч.2. С. 367–370.
6. Морщинина Д. А. Напряженно-деформированное состояние упругого кругового диска, нагруженного сосредоточенными силами и моментами // Тезисы докладов V международной конференции по механике «Поляховские чтения», Санкт-Петербург, 2009. С. 179.
7. Морщинина Д. А. Напряженно-деформированное состояние интраокулярных линз // Четырнадцатая Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов. Аннотации работ победителей грантов Санкт-Петербурга 2009 года для студентов, аспирантов, молодых ученых и молодых кандидатов наук. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. С. 35–36.
8. Морщинина Д. А. О прочности интраокулярных линз // Материалы конференции «Петербургские чтения по проблемам прочности», Санкт-Петербург, 2010 (апрель). С. 315–317.
9. Морщинина Д. А. Напряжения и перемещения в изотропном диске, нагруженном самоуравновешенными силами и моментами // Материалы конференции «Актуальные проблемы прочности», Киев, 2010 (июнь). С. 236.