

напряженно-деформированного состояния левой коронарной артерии (ЛКА) с 75% стенозом передней нисходящей артерии. В постстенотическом сегменте давление падает на 70% и наблюдается рециркуляция потока. В результате данной патологии наблюдается уменьшение объемного кровотока ЛКА на 40%.

При аортокоронарном шунтировании между артерией, в которой имеются атеросклеротические изменения, и аортой создается дополнительный обходной путь (шунт). В результате кровь в пораженную артерию поступает прямо из аорты в обход атеросклеротической бляшки, препятствующей нормальному кровотоку.

Численный анализ гемодинамики ЛКА с 75% стенозом передней нисходящей артерии после аортокоронарного шунтирования внутренней грудной артерией диаметром 2.3 мм показал снижение давления в постстенотическом сегменте в диастолу, что компенсируется кровотоком, поступающим по шунту в систолу. При этом наблюдается восстановление объемного кровотока во всей левой коронарной артерии.

Полученные результаты позволят разработать методику выбора рационального хирургического лечения ишемической болезни сердца.

Работа поддержана Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере в программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК») в 2012 – 2013 гг.

## **НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И УСТОЙЧИВОСТЬ СЕГМЕНТА СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГРУЗА С ПЛОСКИМ ОСНОВАНИЕМ**

**Ермаков А. М.**

Санкт-Петербургский государственный университет

[Khopesh\\_ra@mail.ru](mailto:Khopesh_ra@mail.ru)

**Введение.** Деформации оболочек при приложении груза с плоским основанием являются большими и описываются уравнениями геометрически нелинейной теории оболочек [1]. Поэтому в основу решения задачи положен метод последовательных нагружений – дельта-метод. Особенность дельта-метода состоит в том, что благодаря применению линейных физических соотношений удастся свести задачу на каждом отдельном шаге к решению линейной системы с постоянными коэффициентами.

**Основная часть.** Для решения задачи используется теория анизотропных оболочек средней толщины Палия–Спиро [2]. Это теория оболочек средней толщины, в которой приняты следующие гипотезы:

- 1) прямолинейные волокна оболочки, перпендикулярные к ее срединной поверхности до деформации, остаются после деформации также прямолинейными;
  - 2) косинус угла наклона оболочки таких волокон к срединной поверхности деформированной оболочки равен осредненному углу поперечного сдвига.
- Проводится сравнение результатов полученных с использованием метода линеаризации нелинейных уравнений равновесия [2–3] и метода минимизации

упругого потенциала оболочки [4–5].

Особенность метода линеаризации нелинейных уравнений теории оболочек состоит в том, что благодаря применению линейных физических соотношений на малом отрезке нагружения удается свести задачу на каждом отдельном шаге к решению линейной системы с постоянными коэффициентами, совпадающей с линейной системой ненагруженного тела. Таким образом, исходные уравнения теории записываются для добавок (приращений), а в приведенных уравнениях вводятся величины параметров напряженного и деформированного состояния оболочки на предыдущем уровне нагружения. Расчет заканчивается, когда нагрузка или деформация достигает заданной конечной величины. К сожалению, в общем случае метод линеаризации приводит к неоправданному завышению объема вычислительной работы. Уравнения в добавках позволяют при известных значениях величин параметров напряженного и деформированного состояния оценить устойчивость в малом. Пусть на одном из этапов приращение нагрузки равно нулю, тогда приращения усилий, перемещений и параметров деформаций к предыдущему состоянию могут быть не равны нулю только в случае появления новой формы равновесия (статический критерий устойчивости). Таким образом, новая форма равновесия получается явно, резким изменением приращения к функции нагружения. И для продолжения нагружения требуется перераспределить существующую нагрузку по новой форме поверхности.

В основе второго способа решения лежит идея минимизация функционала потенциальной энергии оболочки с использованием метода Рунге и дальнейшее продолжение решения по параметру нагружения [4–5]. Однако в данной работе, будет учтено, что на каждом из этапов нагружения оболочка поменяла свою форму, и в уравнении упругого потенциала каждый раз будут входить новые коэффициенты Ламе и кривизны. Это необходимо, для уточнения области соприкосновения со штампом от шага к шагу и перерасчета области воздействия груза. Для существования решения определитель полученной системы должен быть отличен от нуля, точка, в которой он обратится в 0, будет критической. В таком случае для получения закритического состояния требуется сменить параметр нагружения.

Задачи о напряженно-деформированном состоянии мягких и близких к мягким оболочек под действием груза с плоским основанием важны для анализа данных, связанных с измерением очень важной в офтальмологии характеристики – внутриглазного давления (ВГД). При аппланационной тонометрии глаз деформируется грузом с плоским основанием. Так по методу Маклакова по заданной величине груза – 10 грамм регистрируют диаметр зоны контакта с роговицей и по измеренному диаметру оценивают ВГД. По линейке Поляка радиус области контакта груза с роговицей находящейся под действием среднего внутриглазного давления в 22 (mm Hg) равен приблизительно 3 мм. Напомним, что  $1 \text{ mm Hg} = 133,3 \text{ Па}$ . Однако, эта зависимость может нарушаться после кераторефракционных операций, используемых для коррекции зрения, так как в их результате существенно меняется толщина роговицы в

средней зоне, ее кривизна и упругие свойства [6–9].

**Заключение.** На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Под действием груза с плоским основанием в окрестности полюса купола сегмента сферической оболочки возникает ненагруженная область. Чем более пологую форму имеет оболочка, тем больше радиус области контакта со штампом и радиус внутренней ненагруженной области, что в свою очередь ведет к занижению вычисляемого значения ВГД. Уменьшение значения толщины по мере приближения к полюсу так же приводит к увеличению радиусов контактной области, однако этот параметр меньше влияет на измеряемое значение ВГД, чем более пологая форма оболочки.

2. Радиус внутренней, ненагруженной, области полученный по методу линеаризации меньше радиуса полученного по методу минимизации упругого потенциала, что может быть объяснено прямым учетом функции усилия в первом методе. При решении с использованием метода линеаризации ненагруженная область возникает раньше, при меньших давлениях, чем по методу минимизации. Общий вид функции распределения контактных усилий рассмотренных методов на первых шагах нагружения практически идентичен. Однако при больших деформациях, радиус внутренней ненагруженной области, получаемый с использованием метода минимизации потенциальной энергии оболочки, становится существенно больше, чем радиус, полученный по методу линеаризации.

#### Литература

1. Катор Б. Я. *Контактные задачи нелинейной теории оболочек вращения*. Киев: Наукова думка. – 1990. – С. 32 – 95.
2. Палий О. М., Спиро В. Е. *Анизотропные оболочки в судостроении. Теория и расчет*. Ленинград: Кораблестроение. – 1977. – 386 с.
3. Лавендел Э. Э. *Расчет резино-технических изделий*. М.: Машиностроение.– 1997. – С. 146 – 154.
4. Карпов В. В., Баранова Д. А., Беркалиев Т. Р. *Программный комплекс исследования устойчивости оболочки*. СПб.: Изд-во СПбГАСУ. – 2009. – С. 16 – 20.
5. Москаленко Л. П. *Методика исследования устойчивости пологих ребристых оболочек на основе метода продолжения решения по наилучшему параметру* // Вестник гражданских инженеров №4 (29). – 2011. – с. 161 – 164.
6. Тарутта Е. П., Еричев В. П., Ларина Т. Ю. *Контроль уровня ВГД после кераторефракционных операций*. // Биомеханика глаза. М.: Ин-т глазных болезней им. Гельмгольца. – 2004. – С. 120 – 122.
7. Аветисов С. Э., Бубнова И. А., Антонов А. А. *Исследование влияния биомеханических свойств роговицы на показатели тонометрии* // Бюллетень СО РАМН. – № 4. – 2009. – С. 30 – 33.
8. Бауэр С. М., Зимин Б. А., Товстик П. Е. *Простейшие модели теории оболочек и пластин в офтальмологии*. СПб.: Изд-во С.-Петербурга. ун-та. – 2000. – 92 с.
9. Иомдина Е. Н. *Биомеханика склеральной оболочки глаза при миопии: диагностика нарушений и их экспериментальная коррекция*. Дис. докт. биол. наук. – 2000. – 319 с.