

На правах рукописи

УДК 574.3

Николаев Дмитрий Александрович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
ОЦЕНКИ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
АРТЕРИЙ И СОСУДИСТЫХ ПРОТЕЗОВ**

01.02.08 – Биомеханика

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва, 2006 .

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени
Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Саврасов Геннадий Викторович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Нарайкин Олег Степанович,
кандидат технических наук,
Невский Дмитрий Ильич.

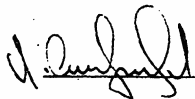
Ведущая организация (предприятие): Научно-исследовательский институт
трансплантологии и искусственных органов МЗ РФ

Защита состоится «22» февраля 2006 г. на заседании диссертационного совета
Д 212.141.14 при Московском государственном техническом университете
им. Н.Э. Баумана, в зале Ученого Совета в 14³⁰.
107005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «17» января 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.т.н., профессор

 Спиридонов И.И.



Сердечно-сосудистые заболевания являются наиболее распространенными в мире. Облитерирующие поражения артерий нижних конечностей составляют более 20 % всех сердечно-сосудистых заболеваний. По мере развития сосудистой хирургии и накопления опыта, все больше больных с атеросклеротическими окклюзиями артерий нижних конечностей подвергаются реконструктивно-восстановительным операциям. Реконструктивные операции сосудистого русла артерий нижних конечностей часто выполняются с использованием аутотрансплантатов, но во многих случаях для лечения используются синтетические протезы различных модификаций. Многие исследователи полагают, что несоответствие упруго-деформационных свойств отрезка протезируемого сосуда и используемого сосудистого протеза существенно повышает риск послеоперационных осложнений (тромбозы, гиперплазия в области анастомоза, аневризматические выпячивания и т.п.). W.M. Abbott и D.J. Boushier-Hayes, в частности, доказали, что при прочих равных условиях протезы, имеющие несоответствие по податливости, чаще подвержены тромбозу в ближайшем и отдаленном послеоперационном периоде. Настоящая работа посвящена оценке функциональных биомеханических свойств протезов кровеносных сосудов.

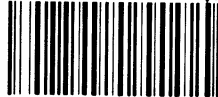
Актуальность работы определяется тем, что существующие модели протезов в недостаточной мере приближены по биомеханическим свойствам к нативным артериям, что ведет к большому количеству послеоперационных осложнений, вызванных биомеханической несовместимостью. Традиционно регистрируемые до сих пор показатели (разрывные напряжение и относительная деформация изделия) не отражают в достаточной степени упруго-деформационные свойства сосудистых протезов, так как информация о механических свойствах сосудистых заменителей, отражающая характер их функционирования после имплантации в сосудистое русло, может быть получена только при динамических нагрузках, приближенных к физиологическим.

Целью работы явились разработка и обоснование критерия биомеханической совместимости кровеносных сосудов и их протезов, разработка стендовой установки для измерения скорости распространения пульсовой волны и проведение экспериментальных исследований.

Задачи диссертации:

1. Разработка критерия биомеханической совместимости сосудистых протезов и магистральных артерий нижних конечностей;

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1738141

Николаев Д.А. Разработка м

МГТУ,
ИМ. Н. Э. БАУМАНА
БИБЛИОТЕКА

2. Разработка методики и стенда для измерения скорости распространения пульсовой волны *in vitro*;
3. Разработка стенда для измерения динамической податливости сосудистых протезов;
4. Разработка компьютерного интерфейса для разрывной машины Instron-1122;
5. Проведение исследований скорости распространения пульсовой волны и динамической податливости сосудистых протезов различных типов, выбор оптимального сосудистого протеза по критерию биомеханической совместимости;
6. Выработка рекомендаций по улучшению биомеханических свойств сосудистых протезов.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы использовались метод измерения податливости по стандарту ИСО 7198, метод испытания на одноосное растяжение до разрыва, оригинальный метод измерения скорости распространения пульсовой волны давления *in vitro*, а также методы теории упругости, методы динамики вязкой несжимаемой жидкости, линейной теории одномерных волн и методы математической статистики.

Научная новизна. В процессе решения поставленных задач получены следующие новые научные результаты.

1. Разработан критерий биомеханической совместимости крупных артерий и сосудистых протезов, учитывающий устойчивость потока в области анастомозов. Численные значения критерия определены для подвздошной и бедренной артерий.
2. Разработан метод исследования скорости распространения пульсовой волны в артериях и сосудистых протезах *in vitro* в контролируемых условиях, соответствующих режиму физиологических нагрузок.
3. Предложен алгоритм обеспечения биомеханической совместимости, состоящий в последовательном подборе толщины стенки и параметров материала протеза для удовлетворения сочетанию прочностных требований и критерия биомеханической совместимости.

Практическая ценность.

1. Разработана стендовая установка для измерения скорости распространения пульсовой волны в артериях и сосудистых протезах *in vitro* в условиях моделирования физиологического режима потока через образец.
2. Получены данные о биомеханических характеристиках (скорости распространения пульсовой волны, податливости, прочностных свойствах) сосудистых протезов различных типов, включая

эндопротезы, а также дезоблитерированные бедренные и подвздошные артерии и артерии с установленными эндопротезами. Обоснован выбор эндопротеза в качестве оптимального заменителя артерии.

3. Методы измерения скорости распространения пульсовой волны в артериях и сосудистых протезах и измерения динамической податливости внедрены в Испытательной лаборатории Научного Центра сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева РАМН. Стендовые установки для проведения испытаний аттестованы ФГУ «РосТест».
4. Разработан компьютерный интерфейс для разрывной машины Instron-1122.
5. Результаты исследований прочностных характеристик, динамической податливости и скорости распространения пульсовой волны давления внедрены в ЗАО НПК «Экофлон» (С.-Петербург) при разработке новых модификаций сосудистых протезов из п-ПТФЭ.

Апробация работы проведена на базе факультета «Биомедицинской техники» МГТУ им. Н.Э. Баумана и Экспериментального отделения Научного центра сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева РАМН.

Основные положения работы обсуждались на:

- Международной конференции по новым материалам СИМТЕС2002, Флоренция, 2002 г.
- VII Всероссийской конференции по биомеханике, Нижний Новгород, 2004 г.
- Всероссийском съезде сердечно-сосудистых хирургов, Москва, 2001 г., 2002 г., 2003 г., 2005 г.
- Научно-технической конференции «Медико-технические технологии на страже здоровья», 2001 г., 2002 г., 2003 г.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования РФ № А03-2.10-447. В ходе выполнения работы по заказу ЗАО НПК «Экофлон» (С.-Петербург) были проведены НИОКР «Исследование скорости распространения пульсовой волны давления в сосудистых протезах «Экофлон» (на базе НЦ ССХ им. А.Н. Бакулева, 2001-2005 г.) и «Исследование упруго-деформационных характеристик протезов из п-ПТФЭ «Экофлон» (на базе МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001-2002 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы из 125 наименований и 3 приложений. Основное содержание работы изложено на 117 страницах, содержит 45 рисунков и 19 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении по литературным источникам дан обзор проблемы, показана актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, отмечены научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе проанализированы современные проблемы протезирования артерий, рассмотрены требования, предъявляемые к сосудистым протезам, а также методы испытаний биомеханических свойств кровеносных сосудов и их протезов. Сформулированы цели и задачи работы.

Проанализированы методы хирургической реконструкции сосудистого русла нижних конечностей при синдроме Лериша. Рассмотрены операции протезирования и шунтирования артерий нижних конечностей, показано, что наибольшее количество осложнений при этих операциях на подвздошно-бедренном сегменте связано с тромбозом эксплантатов (28%), интимальной гиперплазией (30%) и развитием атеросклероза (42%).

Рассмотрены существующие типы сосудистых протезов, определены характерные особенности для каждого типа. Показано, что сосудистые протезы различаются как по конструкции и применяемым материалам, так и по функциональным свойствам. Для текстильных сосудистых протезов биомеханические свойства стенки важны лишь в ближайшем послеоперационном периоде; в отдаленном послеоперационном периоде жесткость протеза определяется соединительно-тканной капсулой. Для ПТФЭ протеза биомеханические свойства важны на протяжении всего срока имплантации.

Проведен анализ требований к сосудистым протезам, сформулированных в научных работах и стандартах на этот вид изделий. Требования разделены на требования к материалу протеза (биосовместимость, гемосовместимость, биостабильность); конструктивные требования (пористость, проницаемость стенки), требования связанные с особенностями проведения хирургического вмешательства (усилие прокола, усилие вырывания нити, минимальный радиус перегиба, стретч-эффект); требования к механической прочности и надежности (прочность и предельное относительное удлинение в продольном и окружном направлениях, предельное внутреннее давление, долговечность); требования к функциональным механическим свойствам в физиологическом диапазоне нагрузок (податливость, вязкоупругие свойства, скорость распространения пульсовой волны). Показано, что современные стандарты не достаточно учитывают функциональные

характеристики протезов, определяющие их биомеханическую совместимость с нативными артериями.

Рассмотрены биомеханические параметры артерий, проанализированы анатомические, прочностные и упруго-деформационные свойства подвздошных и бедренных артерий человека, а также характер пульсового кровотока в них.

Проведен анализ существующих методов исследования биомеханических свойств артерий. Рассмотрены методы исследования прочностных, вязкоупругих свойств и долговечности. Показано, что исследования податливости протеза и скорости распространения пульсовой волны в нем, проводимые на специальных стендовых установках, моделирующих физиологические нагрузки на протез, занимают важное место при системном подходе к оценке биомеханических свойств протезов. Сформулированы требования к исследованию скорости пульсовой волны *in vitro*.

Вторая глава посвящена анализу факторов, определяющих биомеханическую совместимость кровеносных сосудов и сосудистых протезов. Проведенный анализ позволил выделить три фактора, связанных с нарушениями гидродинамики (изменение структуры потока, рост касательных напряжений на стенке, образование вихревых и застойных зон), а также фактор, определяемый напряженно-деформированным состоянием стенки артерии (рис.1).

Механика

Напряженно-деформированное состояние стенки артерии
(Brown C.H. et al., 1975;
Пурина Б.А., Касьянов В.А.,
1980;
Карварен Э.С., 1986;
Fung Y.C., Lin S.Q., 1994;
Hofer M. et al., 1996;
Sottiturai V.S., 1999)

Гидродинамика

Зоны отрыва и застойные зоны
(Карварен Э.С., 1985;
Goldsmith H.L., Karino T., 1978)

Касательные напряжения на стенке
(Nerem R.M., 1990; Ando J.,
1988; Хакотин В.М., 1986)

Закрученная структура потока
(Городков А.Ю., 2003)

Биомеханическая
совместимость

Рис.1. Факторы биомеханической совместимости сосудистых протезов.

Далее в работе показано, что податливость является одним из важнейших параметров оценки биомеханической совместимости. Она влияет на объемный кровоток, механические напряжения и форму проточного канала в области анастомоза. Возникающее в результате несоответствия податливостей протеза и артерии искажение проточного канала ведет к образованию пристеночных вихревых структур и застойных зон, что является причиной развития тромбоза и неинтимальной гиперплазии дистального анастомоза.

На основе проведенного анализа предложен критерий совместимости по податливости кровеносных сосудов и их протезов, предотвращающий искажение проточного канала, образование зон отрыва и застойных зон. При построении критерия использовано условие устойчивости потока в расширяющемся канале: $\alpha Re < 12$, где α - угол расширения канала, Re - число Рейнольдса (Бэтчелор Дж., 1973; Шлихтинг Г., 1974). Критерий устойчивости потока в расширяющемся канале сформулирован для случая косого тонкого анастомоза с нежестким шовным материалом и представляет собой условие

$$tg\gamma < \frac{48\rho}{Re \left| \frac{1}{w_1^2} - \frac{1}{w_2^2} \right| \Delta p},$$

где $tg\gamma$ - тангенс угла наклона анастомоза относительно продольной оси, w_1, w_2 - скорости распространения пульсовой волны в протезе и в артерии соответственно, ρ - плотность крови, Δp - величина систолического давления.

Получены значения критерия для артерий нижних конечностей (w_1 [м/с]):

для подвздошной артерии

$$\left\{ \begin{array}{l} tg\gamma < \frac{4,3}{\left| \frac{1000}{w_1^2} - 14,5 \right|}, \\ tg\gamma < \frac{4,3}{\left| \frac{1000}{w_1^2} - 21,0 \right|}; \end{array} \right.$$

для бедренной артерии

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{иг} \gamma < \frac{4,3}{\frac{1000}{w_1^2} - 11,3} \\ \text{иг} \gamma < \frac{4,3}{\frac{1000}{w_1^2} - 17,3} \end{array} \right.$$

Для косого анастомоза под углом 45° , диапазоны допустимых значений скорости распространения пульсовой волны для магистральных артерий нижних конечностей таковы: для подвздошной артерии $7,2 \text{ м/с} < w_1 < 7,7 \text{ м/с}$; для бедренной артерии $8,0 \text{ м/с} < w_1 < 8,7 \text{ м/с}$. Соответствующие диапазоны допустимых податливостей ($\%/100 \text{ мм.рт.ст.}$): для подвздошной артерии $11,4 < C_1 < 13,1$; для бедренной артерии $8,9 < C_1 < 10,6$.

Предложен алгоритм обеспечения биомеханической совместимости, состоящий в последовательном подборе толщины стенки и параметров материала протеза для удовлетворения сочетанию прочностных требований и критерия биомеханической совместимости (рис.2).

Третья глава посвящена разработке методов и технических средств оценки биомеханической совместимости кровеносных сосудов и их протезов.

Сформулированы требования к стенду для измерения скорости пульсовой волны давления *in vitro*. Описана конструкция и принцип работы стенда (рис.3).

Стенд позволяет воспроизводить физиологический режим потока с характерной формой кривых давления и объемного потока через исследуемый образец при помощи искусственного желудочка сердца, имитаторов эластичности аорты и периферического сопротивления, и венозной емкости. Также в стенде предусмотрено специальное устройство для задания осевого натяжения образца. Пульсовые перемещения стенки образца регистрируются оптическими датчиками перемещений. Скорость распространения пульсовой волны (w) определяли по временному сдвигу между характерными точками переднего фронта кривых перемещений стенки, соответствующих половине амплитуды сигнала, по формуле

$$w = \frac{\Delta L}{\Delta t},$$

где ΔL – расстояние между датчиками, Δt – временной сдвиг.

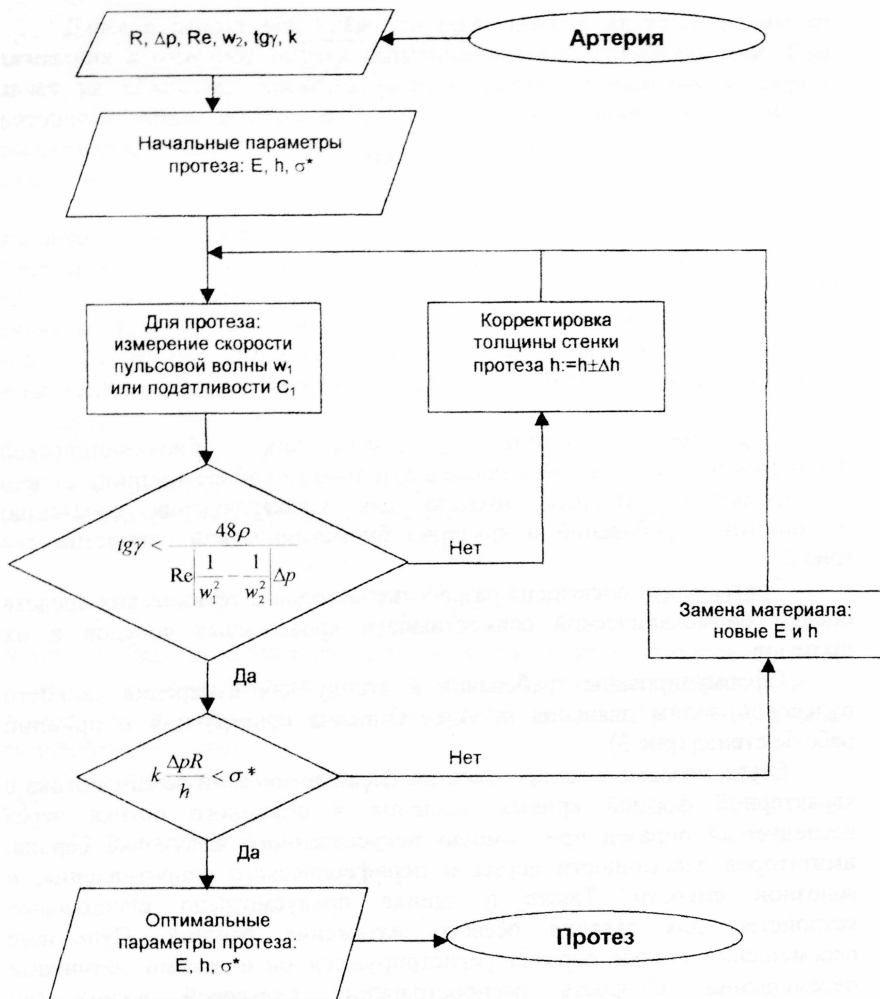


Рис.2. Алгоритм обеспечения биомеханической совместимости (R – радиус артерии, Δp – пульсовый перепад давления, Re – число Рейнольдса, w_2 – скорость пульсовой волны в артерии, $\text{tg} \gamma$ – тангенс угла наклона анастомоза, k – коэффициент запаса по механической прочности, E – модуль Юнга протеза, h – толщина стенки протеза, σ^* – разрывное напряжение материала протеза).

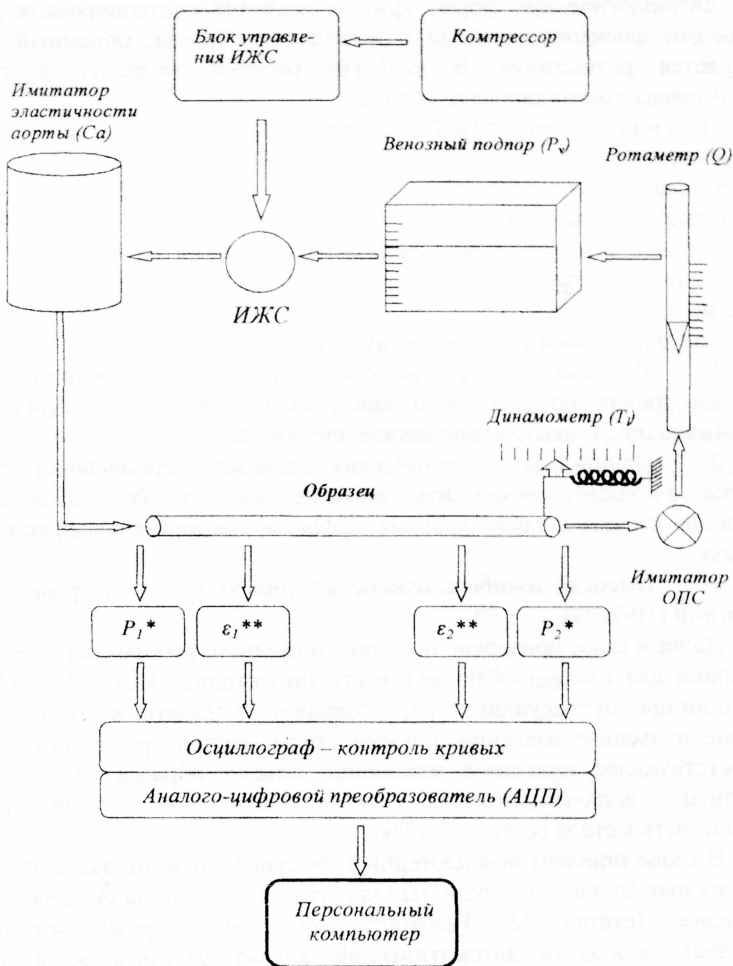


Рис.3. Схема стенда для проведения гидромеханических испытаний кровеносных сосудов и их заменителей (ИЖС – искусственный желудочек сердца, ОПС – общее периферическое сопротивление, P_1 , P_2 – значения давления на входе и выходе из образца, ϵ_1 , ϵ_2 – значения деформации образца в точке расположения датчика перемещения).

Физиологическую форму кривых давления контролировали двумя датчиками давления на входе и выходе из образца; объемный поток измеряется ротаметром. В качестве рабочей жидкости в стенде использована дистиллированная вода.

В стенде реализована возможность получения и хранения измеряемых сигналов с целью последующей обработки. Для этого использовано устройство сопряжения стенда с ПЭВМ, содержащее специально разработанный 4-х канальный АЦП. АЦП позволяет осуществлять преобразование аналоговых сигналов с амплитудой до 5В в 10-ти-разрядный цифровой код в двух режимах: по двум каналам с частотой 9,6 кГц.

Отличительными особенностями стенда являются:

1. Возможность задания физиологического режима нагрузок, включая уровни артериального давления и общего периферического сопротивления, а также осевое натяжение образца.
2. Использование оптических датчиков перемещения стенки образца позволяет исключить влияние датчика на механическое поведение стенки, а также краевые эффекты, связанные с закреплением образца.
3. Высокая точность измерений (около 1.5%) по сравнению с аналогами (10-25%).

Далее в главе приведено описание и принцип работы разработанной установки для измерения податливости по методике ИСО 7198. Стенд, при помощи пульсдубликатора, позволяет создавать в исследуемом образце пульсовое давление и посредством мерной трубки определять соответствующее пульсовое изменение объема образца. В установке применен волюметрический метод измерения податливости. Погрешность метода составила 17%.

В главе описаны компьютерный интерфейс и методика испытания кровеносных сосудов и сосудистых протезов на разрыв на универсальном комплексе Instron-1122. Разработанный компьютерный интерфейс позволяет проводить автоматический анализ результатов, а также реализовывать сложные режимы нагружения образца для исследований вязкоупругих свойств.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований. Проведены исследования скорости пульсовой волны и податливости сосудистых протезов различных типов. По результатам измерений скорости пульсовой волны (w) рассчитывали соответствующую ей податливость сосудистого русла (C_F), используя соотношение из линейной теории распространения волн

$$C_p = \frac{1}{2\rho w^2},$$

где ρ - плотность жидкости.

Исследование выявило большую вариабельность податливости протезов (рис.4): от $2,8 \pm 0,1$ (%/100мм.рт.ст.) для негофрированного вязаного протеза «Смена» до $12,5 \pm 0,5$ для ПТФЭ протеза Экофлон 2004 г. выпуска. Наиболее близкой податливостью к податливости трупной бедренной артерии обладают (%/100мм.рт.ст.): ксенопротез $9,9 \pm 0,9$; тканый протез USCI $8,1 \pm 0,4$; плетеный «Север» $8,8 \pm 0,4$; ПТФЭ протезы Gore-Tex $8,4 \pm 0,8$ и Экофлон 2004 $12,5 \pm 0,5$. Показано хорошее соответствие между полученными результатами и данными исследований *in vitro* в статике Н.Б. Добровой и *in vivo* W.M. Abbott.

Проведен сравнительный анализ результатов измерений податливости по методике ИСО 7198 и ее расчетным значением на основе данных о скорости пульсовой волны. Показана высокая корреляция методов ($R^2=0,9988$). Выявлена систематическая метрологическая погрешность около 7% (рис.5).

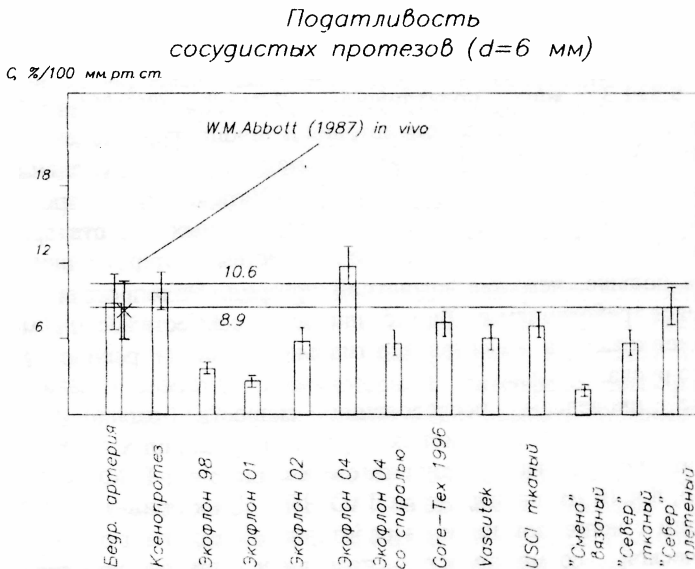


Рис.4. Расчетная динамическая податливость сосудистых протезов и бедренной артерии.

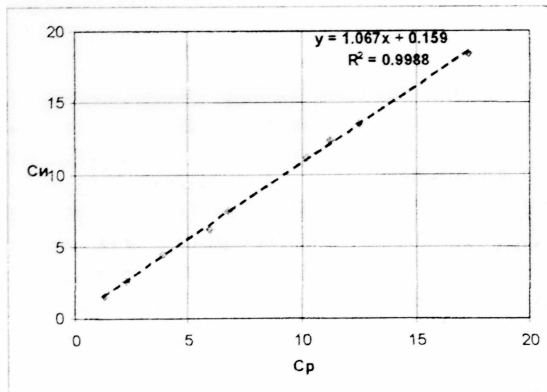


Рис.5. Корреляция между измеренной (Si) и расчетной (Cr) податливостями.

Проведено исследование биомеханических свойств эндоваскулярных протезов Экофлон. Показано, что имплантация эндопротеза после эндартерэктомии по внутренней эластической мембране понижает податливость сосудистого русла по сравнению с интактной артерией: на 16% для бедренной артерии, на 11% для подвздошной. Сравнительный анализ показал, что система артерия-эндопротез обладает биомеханической совместимостью, сопоставимой с лучшими значениями для обычных протезов: скорость пульсовой волны в системе $9,3 \pm 1,3$ м/с; податливость $7,7 \pm 1,8$ (%/100/мм.рт.ст.). Исследование прочностных свойств артерий и эндопротезов показало, что эндартерэктомия с удалением интимы и медики ведет к уменьшению прочности артерии в среднем на $41 \pm 18\%$. Установка эндопротеза в достаточной мере компенсирует потерю прочностных свойств артерии при эндартерэктомии: разрывное усилие для системы артерия-эндопротез на $34 \pm 12\%$ больше, чем для интактной артерии. Эндопротезирование удовлетворяет требованиям по биомеханической совместимости и может быть рекомендовано в качестве оптимального метода реконструкции сосудистого русла.

Также проведены исследования скорости распространения пульсовой волны для сосудистых протезов различных диаметров. Показано, что использование результатов исследований ПТФЭ протезов диаметров 6, 8 и 10 мм производства ЗАО НПК «Экофлон» и выработка рекомендаций с использованием разработанного алгоритма обеспечения биомеханической совместимости позволили оптимизировать их биомеханические свойства. Серия протезов 2004 г. выпуска в большей степени удовлетворяет требованиям биомеханической совместимости. Скорости пульсовой волны для этих протезов составляют: для 6 мм – 7,3 м/с; для 8 мм – 7,6 м/с; для 10 мм – 7,7 м/с.

ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Проведен анализ факторов биомеханической совместимости кровеносных сосудов и их протезов. Показано, что податливость является одним из наиболее значимых параметров оценки биомеханической совместимости.
2. Предложен критерий совместимости по податливости кровеносных сосудов и их протезов, предотвращающий искажение проточного канала, образование пристеночных вихревых структур и застойных зон, которые являются причиной развития тромбоза дистального анастомоза и неоинтимальной гиперплазии.
3. На основе предложенного критерия биомеханической совместимости для косого тонкого анастомоза под углом 45^0 определены диапазоны допустимых значений скорости распространения пульсовой волны артерий нижних конечностей: для подвздошной артерии $7,2 \text{ м/с} < w_1 < 7,7 \text{ м/с}$; для бедренной артерии $8,0 \text{ м/с} < w_1 < 8,7 \text{ м/с}$. Соответствующие диапазоны допустимых податливостей (%/100 мм.рт.ст.): для подвздошной артерии $11,4 < C_1 < 13,1$; для бедренной артерии $8,9 < C_1 < 10,6$.
4. Предложен алгоритм обеспечения биомеханической совместимости, состоящий в последовательном подборе толщины стенки и параметров материала протеза для удовлетворения сочетанию прочностных требований и критерия биомеханической совместимости.
5. Разработан стенд и методика проведения измерений скорости распространения пульсовой волны *in vitro* в условиях физиологического потока. Стенд аттестован ФГУ «РосТест» и используется в испытательной лаборатории НЦ ССХ им. А.Н. Бакулева.
6. Разработана и аттестована установка для измерения податливости по методике ISO 7198. Установка аттестована ФГУ «РосТест» и используется в испытательной лаборатории НЦ ССХ им. А.Н. Бакулева. Разработан компьютерный интерфейс для разрывной машины Instron-1122, позволяющий реализовывать сложные режимы нагружения.
7. Проведено сравнительное исследование податливости для сосудистых протезов различных типов. Исследование выявило большую вариабельность податливости протезов: от $2,8 \pm 0,1$ (%/100мм.рт.ст.) для негофрированного вязаного протеза «Смена» до $12,5 \pm 0,5$ для ПТФЭ протеза Экофлон 2004 г. выпуска. Наиболее близкой податливостью к податливости трупной бедренной артерии обладают (%/100мм.рт.ст.): ксенопротез $9,9 \pm 0,4$; тканый протез USCI $8,1 \pm 0,4$;

плетеный «Север» $8,8 \pm 0,4$; ПТФЭ протезы Gore-Tex $8,4 \pm 0,4$ и Экофлон 2004 $12,5 \pm 0,5$.

8. Проведено исследование биомеханических свойств эндоваскулярных протезов Экофлон. Показано, что эндопротезирование удовлетворяет требованиям по биомеханической совместимости: имплантация эндопротеза после эндартерэктомии по внутренней эластической мембране понижает податливость сосудистого русла по сравнению с интактной артерией на 16% для бедренной артерии и на 11% для подвздошной. Исследование прочностных свойств показало, что установка эндопротеза в достаточной мере компенсирует потерю прочностных свойств артерии при эндартерэктомии.
9. Использование результатов исследований ПТФЭ протезов диаметров 6, 8 и 10 мм производства ЗАО НПК «Экофлон» позволило оптимизировать их биомеханические свойства. Серия протезов 2004 г. выпуска находится в хорошем согласии с требованиями биомеханической совместимости. Скорости пульсовой волны для этих протезов составляют: для 6 мм – 7,3 м/с; для 8 мм – 7,6 м/с; для 10 мм – 7,7 м/с.

Список работ по теме диссертации:

1. Методика экспериментальной оценки механических свойств кровеносных сосудов и их заменителей *in vitro* / Г.В. Саврасов, А.Ю. Городков, Д.А. Николаев и др. // Медицинские технологии на страже здоровья: Тез.докл. III международной конференции.- Анталия, 2001. - С. 104.
2. Экспериментальная оценка динамических упруго-деформационных характеристик синтетических сосудистых протезов в физиологическом диапазоне нагрузок *in vitro*/ А.Ю. Городков, Д.А. Николаев, М.В. Соколов, Н.Б. Доброва // V ежегодная сессия НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН: Тез.докл. всероссийской конференции.- Москва, 2001.- С. 158.
3. Сравнительные исследования упруго-деформационных свойств различных модификаций отечественных сосудистых протезов из пористого политетрафторэтилена «Экофлон» / А.Ю. Городков, Д.А. Николаев, М.В. Соколов и др. // VII Всероссийский съезд сердечно-сосудистых хирургов: Тез.докл.- Москва, 2001.- С. 252.
4. Сравнительные исследования биомеханических свойств синтетических сосудистых протезов из пористого политетрафторэтилена, изготовленных по различным технологиям / Д.А. Николаев, А.Ю. Городков, М.В. Соколов, Г.В. Саврасов // VI ежегодная сессия НЦССХ

- им. А.Н. Бакулева РАМН: Тез.докл. всероссийской конференции.- Москва, 2002.- С. 180.
5. Sokolov M.V., Gorodkov A.J., Nikolaev D.A. Visco-elastic properties of synthetic vascular grafts under physiological loading // Proceedings from 6th Int. Conf. "Materials in clinical application" / Ed. P.Vincenzini, R. Barbucci. – Florence: Techna Srl., 2002. – P. 383-388.
 6. Саврасов Г.В., Николаев Д.А., Городков А.Ю. Сравнительные исследования упруго-деформационных свойств различных модификаций сосудистых протезов // Медицинские технологии на страже здоровья: Тез.докл. IV международной конференции.- Анталия, 2002. - С. 134.
 7. Николаев Д.А. Исследования биомеханических свойств эндовазальных сосудистых протезов из пористого политетрафторэтилена // VII ежегодная сессия НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН: Тез.докл. всероссийской конференции.- Москва, 2003.- С. 246.
 8. Городков А.Ю., Николаев Д.А., Соколов М.В. Исследования динамических упругодеформационных свойств кровеносных сосудов и их заменителей in vitro // Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН, 2003. – Т.4, №7. - С. 67-74.
 9. Николаев Д.А., Саврасов Г.В., Городков А.Ю. Экспертная система для оценки биомеханической совместимости сосудистых протезов и артерий // Медицинские технологии на страже здоровья: Тез.докл. V международной конференции.- Шарм-Эль-Шейх, 2003. - С. 141.
 - 10.Городков А.Ю., Николаев Д.А. Анализ динамических характеристик закрученного потока крови в аорте на основании измерения геометрических параметров проточного канала с помощью магнитно-резонансной томографии // Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН, 2003.- Т. 4, №9. - С. 67-69.
 - 11.Анализ поля скоростей закрученного потока крови в аорте на основании трехмерного картирования с помощью магнитно-резонансной велосиметрии / Л.А. Бокерия, А.Ю. Городков, Д.А. Николаев и др. // Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН.- 2003.- Т.4, №9. - С. 70-74.
 - 12.Николаев Д.А., Саврасов Г.В. Технологическая биомеханика хирургических операций на магистральных артериях нижних конечностей // VII всероссийская конференция по биомеханике: Тез.докл.- Н.-Новгород, 2004. – Т.2.- С. 83.
 - 13.Сравнительный анализ скорости распространения пульсовой волны in vitro и динамической податливости сосудистых протезов / Д.А. Николаев, Г.В. Саврасов, А.Ю. Городков, В.Е. Дьяков // XI всероссийский съезд сердечно-сосудистых хирургов: Тез.докл.- Москва, 2005.- С. 303.

14. Исследование биомеханических свойств артерий нижних конечностей и сосудистых протезов / Д.А. Николаев, Д.В. Пузенко, С.В. Белов и др. // XI всероссийский съезд сердечно-сосудистых хирургов: Тез. докл. - Москва, 2005. - С. 119.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'А.А. Николаев', is located below the text of the first reference.

У1738141

Николаев Д.А.
Разработка методов и
технических средств оценки
биомеханических свойств
артерий и сосудистых прот...

У 1738141

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

Принято к исполнению 13/01/2006
Исполнено 14/01/2006

Заказ № 12
Тираж: 100 экз.

ООО «11-й ФОРМАТ» ИНН 7726330900
Москва, Варшавское ш., 36
(095) 975-78-56
(095) 747-64-70
www.autoreferat.ru