

# 02, февраль 2016

УДК 612.085.4

## **Определение биомеханических характеристик кровеносных сосудов при одноосном растяжении**

**Беликов Н.В.**, аспирант

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Биомедицинские технические системы»*

**Борде А.С.**, магистрант

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Биомедицинские технические системы»*

**Волчёнкова А.М.**, магистрант

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Медико-технический менеджмент»*

*Научный руководитель: Саврасов Г.В., д.т.н., профессор  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Биомедицинские технические системы»*

[bmt-1@bmstu.ru](mailto:bmt-1@bmstu.ru)

### **Введение**

В связи с ростом количества сердечно-сосудистых заболеваний по всему миру задачи исследования биомеханических характеристик сосудов являются крайне актуальными. Для решения данных задач требуется более детальное изучение процессов, происходящих в сосудах.

Одним из способов, позволяющих получить информацию об их прочностных характеристиках, является проведение биомеханических испытаний. Результаты таких исследований могут быть использованы для создания более точных моделей сосудов и патологических изменений в них [1, 2], моделирования сосудистых операций и решения других задач в области биомеханики [3].

### **Существующие данные**

На текущий момент в литературе приводятся различные данные о деформациях, возникающих в стенках сосудов в физиологических условиях нагружения и при хирургическом вмешательстве [4]. Данные о касательном модуле упругости (модуле Юнга) также разнятся [1, 2, 5]. Это объясняется как различиями в биоматериале,

используемом для испытаний, так и отсутствием унифицированной методики проведения биомеханических испытаний.

### Описание методики

В ходе испытаний использовались брюшная аорта, общая и наружная подвздошные артерии, а также бедренная артерия. Проведение испытаний и обработка данных осуществлялись в соответствии с методикой, описанной в [6].

### Обработка результатов

По результатам испытаний был получен массив, содержащий величины относительного удлинения сосудов и модуля Юнга при напряжениях, соответствующих физиологическому и хирургическому уровням, а также максимальное напряжение для каждого образца.

В ходе статистической обработки результатов было рассмотрено влияние двух факторов: А – вид сосуда (брюшная аорта, общая, наружная подвздошные артерии, бедренная артерия), В – слой (интима, интима-медиа, медиа, адвентиция-медиа, адвентиция, все слои). Таким образом, было выделено 30 групп (каждый тип слоя каждого сосуда). Для дальнейшей обработки были отобраны 15 групп, в каждой из которых до физиологического уровня напряжений дошли без разрыва более 5 образцов. Процентное содержание образцов, выдержавших хирургический уровень напряжений без разрушения, в зависимости от сосуда и слоя (комбинации слоёв) представлено на рисунке 1.

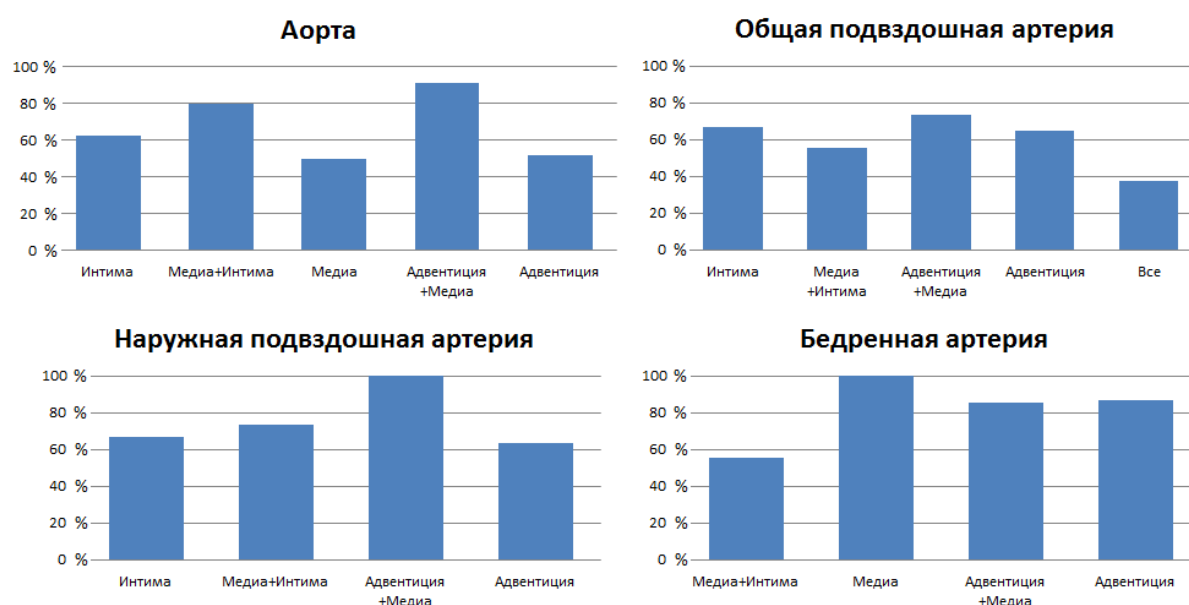


Рис. 1. Процентное содержание образцов, выдержавших хирургический уровень

напряжений без разрушения, в зависимости от сосуда и слоя (комбинации слоёв)

Общая вариация результатов была разделена на систематическую вариацию, обусловленную влиянием изучаемых факторов, и случайную вариацию, обусловленную влиянием случайных факторов [5].

Проверка на нормальность проводилась по критерию Шапиро-Уилка – одному из наиболее эффективных критериев проверки нормальности. Нулевая гипотеза заключалась в нормальном распределении случайной величины  $x$ . Статистика критерия (вероятность того, что данное распределение является нормальным согласно критерию Шапиро-Уилка) имеет вид:

$$W = \frac{1}{s^2} \left[ \sum_{i=1}^k a_{n,i} (x_{n-i+1} - x_i) \right]^2, \quad (1)$$

где  $s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ ,

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

$k = \frac{n}{2}$ , если  $n$  – чётное,

$k = \frac{n-1}{2}$ , если  $n$  – нечётное,

коэффициенты  $a_{n,i}$  определяются из таблиц.

Значения статистики  $W$ , вычисленные по формуле (1) для 15-ти исследуемых групп при выбранном уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты проверки на нормальность данных измерений упруго-деформативных характеристик кровеносных сосудов (в скобках указаны критические значения статистики  $W$ )

Слой	Статистика $W$				
	$\varepsilon_{\text{физ}}$	$E_{\text{физ}}$	$\varepsilon_{\text{хир}}$	$E_{\text{хир}}$	$\sigma_{\text{max}}$
Ао					
А	0,962 (0,842)	0,896 (0,842)	0,871 (0,762)	0,935 (0,762)	0,930 (0,842)
М	0,929 (0,842)	0,850 (0,842)	0,897 (0,762)	0,945 (0,762)	0,873 (0,842)
И	0,933 (0,887)	0,930 (0,887)	0,867 (0,842)	0,955 (0,842)	0,888 (0,887)
А+М	0,897 (0,850)	0,976 (0,850)	0,879 (0,842)	0,885 (0,842)	0,889 (0,850)
М+И	0,970 (0,881)	0,953 (0,881)	0,988 (0,859)	0,960 (0,859)	0,948 (0,881)
ОП					
А	0,956 (0,892)	0,892 (0,892)	0,918 (0,850)	0,971 (0,850)	0,927 (0,892)
А+М	0,951 (0,881)	0,964 (0,881)	0,935 (0,850)	0,934 (0,850)	0,890 (0,881)
М+И	0,871 (0,818)	0,820 (0,818)	0,909 (0,767)	0,864 (0,767)	0,915 (0,818)

НП					
А	0,870 (0,850)	0,944 (0,850)	0,857 (0,803)	0,988 (0,803)	0,879 (0,850)
А+М	0,952 (0,842)	0,952 (0,842)	0,945 (0,842)	0,990 (0,842)	0,886 (0,842)
М+И	0,959 (0,892)	0,960 (0,892)	0,909 (0,829)	0,864 (0,829)	0,915 (0,892)
Б					
А	0,943 (0,881)	0,925 (0,881)	0,947 (0,866)	0,948 (0,866)	0,948 (0,881)
М	0,940 (0,788)	0,945 (0,788)	0,942 (0,788)	0,842 (0,788)	0,856 (0,788)
А+М	0,975 (0,803)	0,923 (0,803)	0,933 (0,788)	0,900 (0,788)	0,944 (0,803)
М+И	0,960 (0,829)	0,975 (0,829)	0,789 (0,762)	0,889 (0,762)	0,918 (0,829)

Здесь и далее:

*Обозначения типов сосудов:*

Ао – аорта; ОП – общая подвздошная артерия; НП – наружная подвздошная артерия; Б – бедренная артерия.

*Обозначения слоёв:*

А – адвентиция; М – медиа; И – интима.

*Обозначения характеристик:*

$\varepsilon_{\text{физ}}$  – относительная деформация при физиологическом уровне напряжений;

$E_{\text{физ}}$  – модуль Юнга при физиологическом уровне напряжений;

$\varepsilon_{\text{хир}}$  – относительная деформация при хирургическом уровне напряжений;

$E_{\text{хир}}$  – модуль Юнга при хирургическом уровне напряжений;

$\sigma_{\text{max}}$  – максимальное напряжение, возникающее в сосуде до разрушения.

По результатам проверки на нормальность данные измерений упруго-деформативных характеристик кровеносных сосудов (модуль Юнга, относительная деформация, предельное напряжение) во всех 15 отобранных группах соответствуют нормальному распределению.

Так как внутри групп результаты измерений подчиняются нормальному закону, использовались параметрические критерии и были определены следующие величины:

- 1) среднее арифметическое значение:

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} x_i, \quad (2)$$

где  $x_i$  – значения экспериментально определённых величин,

$j$  – номер группы,

$n_j$  – объем выборки  $j$ -той группы;

- 2) выборочное стандартное отклонение:

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{n_j - 1} \cdot \sum_{i=1}^{n_j} (x_i - \bar{x}_j)^2}; \quad (3)$$

- 3) доверительный интервал для отдельного измерения.

Погрешность прямых измерений вычисляется по формуле:

$$\Delta x = \sqrt{(t)^2 + (\Delta_u)^2}, \quad (4)$$

где  $t = S_j \cdot t_\alpha$ ,

$t_\alpha$  – квантиль распределения Стьюдента для числа степеней свободы  $\nu = n_j - 1$  и уровня значимости  $\alpha = 0,05$ ;

$\Delta_u$  – абсолютная погрешность средства измерения (инструментальная погрешность, вносимая датчиком и составляющая 0,25 % от  $x_i$ ).

Инструментальная погрешность вследствие её малости не учитывалась. Таким образом, интервал, в который результат единичного измерения попадает с заданной вероятностью  $1 - \alpha$ :

$$\bar{x}_j - t_\alpha \cdot s_j \leq x_i < \bar{x}_j + t_\alpha \cdot s_j \quad (5)$$

На основании наличия нескольких групп сравнения в качестве статистического метода был выбран дисперсионный анализ [7]. За нулевую гипотезу было принято предположение о том, что исследуемые факторы не оказывают никакого влияния на исследуемые величины и полученные различия случайны.

Оценка эффекта отдельного или совместного влияния факторов на исследуемую величину при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  определялась согласно дисперсионному анализу как:

$$F = \frac{S_{A..C}^2}{S_z^2}, \quad (6)$$

где  $S_{A..C}^2$  – дисперсия, варьированная по отдельным факторам:

$$S_{A..C}^2 = \frac{1}{N_{A..C}} \cdot \sum_{j=1}^{N_{A..C}} S_j^2, \quad (7)$$

где  $N_{A..C}$  – количество групп для каждого из двух факторов,

$S_z^2$  – дисперсия, варьированная по случайному фактору:

$$S_z^2 = \frac{m}{N_{A..C} - 1} \cdot \sum_{j=1}^{N_{A..C}} (\bar{x}_j - \bar{x}_{A..C})^2, \quad (8)$$

где  $m$  – объём выборки,

$\bar{x}_{A..C}$  – среднее среди групп для каждого из двух факторов:

$$\bar{x}_{A..C} = \frac{1}{N_{A..C}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{A..C}} \bar{x}_j. \quad (9)$$

Результаты оценки эффекта отдельного или совместного влияния факторов на исследуемую величину представлены в таблицах 2-5 (влияние вида сосуда) и таблицах 6–

9 (влияние слоя). Ячейка закрашена в тех случаях, когда для двух сравниваемых групп нулевая гипотеза принимается, т.е. различия между ними обусловлены случайными факторами и по рассматриваемому признаку данные группы могут быть объединены.

Таблица 2

Результаты оценки эффекта отдельного или совместного влияния факторов: тип сосуда (аорта) и слой на упруго-деформативные характеристики кровеносных сосудов

Слой	Статистика $F$				
	$\varepsilon_{\text{физ}}$	$E_{\text{физ}}$	$\varepsilon_{\text{хир}}$	$E_{\text{хир}}$	$\sigma_{\text{max}}$
Критическое значение $F$	3,630	3,630	6,390	6,390	3,630
Ао					
А	4,213	10,921	2,894	5,510	1,436
М					
Ао					
А	2,928	1,125	1,014	1,487	1,570
И					
Ао					
А	5,510	2,848	4,204	1,247	2,433
А+М					
Ао					
А	1,344	4,200	6,567	1,082	1,386
М+И					
Ао					
М	12,336	9,708	2,853	8,196	1,093
И					
Ао					
М	1,308	3,835	1,453	4,417	3,493
А + М					
Ао					
М	5,662	2,600	2,269	5,963	1,036
М + И					
Ао					
И	16,133	2,531	4,145	1,856	3,819
А + М					
Ао					
И	2,834	3,905	6,474	1,374	1,133
М + И					
Ао					
А + М	5,692	1,543	1,562	1,350	3,371
М + И					

Таблица 3

Результаты оценки эффекта отдельного или совместного влияния факторов: тип сосуда (общая подвздошная артерия) и слой (все) на упруго-деформативные характеристики кровеносных сосудов\*

Слой	Статистика $F$				
	$\varepsilon_{\text{физ}}$	$E_{\text{физ}}$	$\varepsilon_{\text{хир}}$	$E_{\text{хир}}$	$\sigma_{\text{max}}$
Критическое значение $F$	4,350	4,350	19,160	19,160	4,350
ОП					
А	5,712	2,492	3,897	1,692	1,908
А + М					
ОП					
А	5,213	1,723	6,219	4,007	1,587
М + И					
ОП					
А + М	1,096	4,294	1,596	6,777	3,029
М + И					

Таблица 4

Результаты оценки эффекта отдельного или совместного влияния факторов: тип сосуда (наружная подвздошная артерия) и слой (все) на упруго-деформативные характеристики кровеносных сосудов\*

Слой	Статистика $F$				
	$\varepsilon_{\text{физ}}$	$E_{\text{физ}}$	$\varepsilon_{\text{хир}}$	$E_{\text{хир}}$	$\sigma_{\text{max}}$
Критическое значение $F$	4,260	4,260	5,140	5,140	4,260
НП					
А	1,464	1,078	2,803	2,264	3,077
А + М					
НП					
А	1,924	1,484	4,964	2,243	1,077
М + И					
НП					
А + М	1,314	1,600	1,177	1,069	2,857
М + И					

Таблица 5

Результаты оценки эффекта отдельного или совместного влияния факторов: тип сосуда (бедренная артерия) и слой (все) на упруго-деформативные характеристики кровеносных сосудов\*

Слой	Статистика $F$				
	$\varepsilon_{\text{физ}}$	$E_{\text{физ}}$	$\varepsilon_{\text{хир}}$	$E_{\text{хир}}$	$\sigma_{\text{max}}$
Критическое значение $F$	5,410	5,410	6,590	6,590	5,410
Б					
А	1,995	2,608	1,442	1,178	15,421
М					
Б					
А	2,970	4,501	4,023	1,440	3,619
А + М					
Б					
А	1,211	4,400	1,073	4,200	5,074
М + И					
Б					
М	1,488	1,725	2,790	1,235	4,261
А + М					
Б					
М	2,417	1,003	1,344	7,467	3,039
М + И					
Б					
А + М	3,597	1,725	3,751	6,047	1,402
М + И					



Таблица 6

Результаты оценки эффекта отдельного или совместного влияния факторов: слой (адвентиция) и тип сосуда (все) на упруго-деформативные характеристики кровеносных сосудов

Сосуд	Статистика $F$				
	$\epsilon_{\text{физ}}$	$E_{\text{физ}}$	$\epsilon_{\text{хир}}$	$E_{\text{хир}}$	$\sigma_{\text{max}}$
Критическое значение $F$	4,100	4,100	5,140	5,140	4,100
А					
Ао	1,472	5,647	17,317	11,887	1,116
ОП					
А					
Ао	1,024	1,506	19,884	1,677	1,273
НП					
А					
Ао	1,259	7,847	3,742	1,791	17,062
Б					
А					
ОП	1,289	3,751	1,148	7,089	1,141
НП					
А					
ОП	1,169	1,389	4,628	6,636	15,923
Б					
А					
НП	1,507	5,211	5,314	1,068	13,398
Б					

Таблица 7

Результаты оценки эффекта отдельного или совместного влияния факторов: слой (медиа) и тип сосуда (аорта, бедренная артерия) на упруго-деформативные характеристики кровеносных сосудов

Сосуд	Статистика $F$				
	$\epsilon_{\text{физ}}$	$E_{\text{физ}}$	$\epsilon_{\text{хир}}$	$E_{\text{хир}}$	$\sigma_{\text{max}}$
Критическое значение $F$	6,610	6,610	7,710	7,710	6,610
М					
Ао	29,568	2,303	1,142	1,786	3,608
Б					

Таблица 8

Результаты оценки эффекта отдельного или совместного влияния факторов: слой (адвентиция-медиа) и тип сосуда (все) на упруго-деформативные характеристики кровеносных сосудов

Сосуд	Статистика $F$				
	$\epsilon_{\text{физ}}$	$E_{\text{физ}}$	$\epsilon_{\text{хир}}$	$E_{\text{хир}}$	$\sigma_{\text{max}}$
Критическое значение $F$	4,760	4,760	5,410	5,410	4,760
A + M					
Ао	1,027	1,082	1,136	1,279	3,500
ОП					
A + M					
Ао	4,295	1,775	2,318	2,497	7,983
НП					
A + M					
Ао	19,431	1,842	13,450	2,071	2,656
Б					
A + M					
ОП	4,182	1,921	2,633	1,952	2,281
НП					
A + M					
ОП	18,919	1,686	15,274	1,169	1,318
Б					
A + M					
НП	4,524	3,239	5,801	1,206	3,006
Б					

Таблица 9

Результаты оценки эффекта отдельного или совместного влияния факторов: слой (интимамедиа) и тип сосуда (все) на упруго-деформативные характеристики кровеносных сосудов

Сосуд	Статистика $F$				
	$\varepsilon_{\text{физ}}$	$E_{\text{физ}}$	$\varepsilon_{\text{хир}}$	$E_{\text{хир}}$	$\sigma_{\text{max}}$
Критическое значение $F$	4,070	4,070	6,590	6,590	4,070
И + М					
Ао	3,172	2,849	2,048	4,090	2,090
ОП					
И + М					
Ао	1,811	1,811	1,806	3,640	1,075
НП					
И + М					
Ао	1,014	1,193	1,928	2,363	1,493
Б					
И + М					
ОП	5,745	5,161	1,153	1,124	2,246
НП					
И + М					
ОП	3,216	2,387	1,081	9,146	1,340
Б					
И + М					
НП	1,786	2,162	1,067	8,139	1,604
Б					

По результатам оценки с использованием дисперсионного анализа была составлена таблица, в которой были объединены статистически неразличимые характеристики слоёв и сосудов. Группирование проводилось с учётом расположения слоёв в сосудистой стенке и сосудов в сердечно-сосудистой системе.

Результаты сравнения слоёв в зависимости от типа сосуда

	Ао	ОП	НП	Б
А	■	■		
	■	■		
	■	■	■	
	■	■	■	■
А+М	■			
	■			
	■			
	■			
М	■			■
	■			■
	■			■
	■			■
М+И	■	■	■	■
	■	■	■	■
	■	■	■	■
	■	■	■	■
И	■			
	■			
	■			
	■			

Статистически неразличимые характеристики отмечены соответствующими цветами:

$\epsilon_{\text{физ}}$  – ■ ,  $E_{\text{физ}}$  – ■ ,  $\epsilon_{\text{хир}}$  – ■ ,  $E_{\text{хир}}$  – ■ ,  $\sigma_{\text{max}}$  – ■ .

Исходя из полученных данных, был найден диапазон значений характеристик для всех групп. Из получившихся значений сформирована таблица 11.

## Упруго-деформативные и прочностные характеристики артериальных сосудов

Слой	$\varepsilon_{\text{физ}}, \%$	$E_{\text{физ}}, \text{МПа}$	$\varepsilon_{\text{хир}}, \%$	$E_{\text{хир}}, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{max}}, \text{МПа}$
Ао					
А	$47,3 \pm 7,1$	$1,01 \pm 0,16$	$61,6 \pm 9,6$	$1,83 \pm 0,32$	$0,47 \pm 0,09$
А + М		$0,92 \pm 0,24$	$79,1 \pm 30,6$	$1,54 \pm 0,28$	$0,65 \pm 0,09$
М		$0,91 \pm 0,43$	$32,7 \pm 15,7$	$2,84 \pm 1,25$	$0,43 \pm 0,19$
М + И		$1,09 \pm 0,23$	$47,1 \pm 7,7$	$1,66 \pm 0,19$	$0,56 \pm 0,15$
И		$1,35 \pm 0,11$		$2,15 \pm 0,24$	$0,51 \pm 0,14$
ОП					
А	$50,4 \pm 7,5$	$1,01 \pm 0,16$	$61,6 \pm 9,6$	$1,83 \pm 0,32$	$0,52 \pm 0,13$
А + М		$1,13 \pm 0,20$	$70,0 \pm 17,2$	$2,27 \pm 0,26$	$0,77 \pm 0,20$
М + И	$36,6 \pm 7,4$	$1,14 \pm 0,19$	$31,8 \pm 16,4$	$2,60 \pm 1,03$	$0,42 \pm 0,14$
НП					
А	$36,6 \pm 10,5$	$1,10 \pm 0,18$	$61,6 \pm 9,6$	$1,83 \pm 0,32$	$0,87 \pm 0,28$
А + М	$39,2 \pm 9,5$	$1,42 \pm 0,17$	$49,7 \pm 11,6$	$2,46 \pm 0,42$	$1,12 \pm 0,33$
М + И	$36,6 \pm 7,4$	$1,14 \pm 0,19$	$45,9 \pm 10,2$	$2,46 \pm 0,37$	$0,51 \pm 0,12$
Б					
А	$32,3 \pm 10,0$	$1,45 \pm 0,35$	$42,6 \pm 14,4$	$2,34 \pm 0,59$	$0,87 \pm 0,28$
А + М	$35,6 \pm 6,4$	$1,81 \pm 0,42$	$46,6 \pm 7,9$	$3,18 \pm 0,64$	$1,11 \pm 0,26$
М	$33,1 \pm 8,0$	$1,88 \pm 0,39$	$43,4 \pm 11,2$	$2,46 \pm 0,37$	$0,90 \pm 0,15$
М + И	$57,2 \pm 11,4$	$1,12 \pm 0,33$	$54,2 \pm 17,0$		$0,47 \pm 0,17$

**Выводы**

По итогам испытаний образцов брюшной аорты, общей подвздошной, наружной подвздошной и бедренной артерий были получены результаты для 15 групп слоёв и комбинаций слоёв.

Для каждого образца в группе определялись относительная деформация при физиологическом уровне напряжений, модуль Юнга при физиологическом уровне напряжений, относительная деформация при хирургическом уровне напряжений, модуль Юнга при хирургическом уровне напряжений, а также максимальное напряжение, возникающее в сосуде до разрушения.

В результате обработки полученных данных для каждой из исследуемых групп определены средние значения, выборочные стандартные отклонения и доверительные интервалы указанных выше биомеханических характеристик кровеносных сосудов.

Проведён статистический анализ, по результатам которого были выявлены статистические основания для объединения отдельных групп по различным параметрам.

### Список литературы

1. Иванов Ю.А. Технология моделирования эластичной стенки кровеносных сосудов и её приложение в модели кровообращения для решения задач рентгенохирургии // Сборник трудов конференции молодых ученых, выпуск 7. Тезисы докладов научной школы «Технологии высокопроизводительных вычислений и компьютерного моделирования» и «Школьной секции». СПб.: ИТМО, 2009. С. 14.
2. Иванов Д.В., Коссович Е.Л. Артерии человека с патологическими извитостями: клинические данные и численный эксперимент // Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине-2007: материалы ежегодной всерос. науч. школы-семинара. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2007. С. 39–41.
3. Бегун П.И. Биомеханическое моделирование объектов протезирования: учебное пособие. СПб.: Политехника, 2011. 464 с.
4. Войнов В.В., Поспелов В.И., Гаврюшин С.С. Оценка влияния микроробототехнической системы на стенки кровеносного сосуда человека // Экстремальная робототехника: Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции. СПб., 2004. С. 126-133.
5. Пурия Б.А., Касьянов В.А. Биомеханика крупных кровеносных сосудов человека. Рига: Зинатне, 1980. 260 с.
6. Саврасов Г.В., Башлай А.П., Беликов Н.В. Особенности биомеханических исследований при патологическом поражении стенки кровеносных сосудов. // Сб. трудов 15-ой научно-технической конференции «Медико-технические технологии на страже здоровья» (Португалия, о. Мадейра, 20-27 сентября 2013 г.). М: Изд-во: НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. С. 133-137.
7. Гланц С. Медико-биологическая статистика. М.: Практика, 1998. 459 с.