

## ВОЗРАСТНАЯ ДИНАМИКА УПРУГОСТИ ГЛУБОКОЙ ДОРСАЛЬНОЙ ВЕНЫ ПОЛОВОГО ЧЛЕНА ЧЕЛОВЕКА ПО ДАННЫМ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

© А.Н. Стрелков<sup>1</sup>, А.И. Улитенко<sup>2</sup>

ГБУ РО Областная клиническая больница, Рязань, Россия (1)  
ФГБОУ ВО Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Рязань, Россия (2)

**Обоснование.** Венозной системе полового члена отводится важная роль в механизме развития и поддержания эрекции. В то же время, диагностика и хирургическая коррекция нарушенного венозного оттока оказывается успешной далеко не во всех случаях. Частота нарушений эрекции связана с различными факторами, но прогрессивно растет с увеличением возраста. **Цель.** Определить в прямом эксперименте возрастную динамику упругости основного магистрального венозного сосуда полового члена – глубокой дорсальной вены. **Материалы и методы.** Исследования проводились на образцах глубокой дорсальной вены, полученных при аутопсии 30 лиц мужского пола, погибших внезапно от травм или острых заболеваний в возрасте от 18 до 83 лет. Глубокую дорсальную вену полового члена выделяли острым путём без окружающих тканей. Фрагмент вены длиной около 2,5-3,5 см выделяли дистальнее поддерживающей связки, служившей ориентиром. В процессе экспериментов образцы вен подвергались воздействию дискретно возрастающей растягивающей силы в продольном направлении с фиксацией соответствующих абсолютных приращений их длины на специально спроектированной установке по оригинальной методике. **Результаты.** Математический анализ результатов прямых измерений упругих свойств исследуемой вены, позволил выявить существенное – около 20% – уменьшение упругости вены в исследуемом возрастном диапазоне 18 лет – 83 года от  $\alpha_0 = 6,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{Н}$  до  $\alpha_0 = 5,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{Н}$ . С увеличением силовой нагрузки среднее значение упругости вены быстро убывает, асимптотически приближаясь к установившемуся значению порядка  $\alpha = 1,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{Н}$ . При этом сохраняется возрастная тенденция к снижению упругости при различной степени функциональной нагрузки. **Заключение.** Выявленные закономерности снижения упругости отражают изменения стенки глубокой дорсальной вены с возрастом и могут играть роль в возрастном увеличении частоты эректильной дисфункции. Примененный метод определения упругости может быть использован для определения упругости сосудов другой локализации, а также ряда других биологических тканей в норме и при патологии.

**Ключевые слова:** глубокая дорсальная вена, прямое измерение упругости, математический анализ, эректильная дисфункция.



## AGE-RELATED DYNAMICS OF ELASTICITY OF DEEP DORSAL VEIN OF HUMAN PENIS ACCORDING TO RESULTS OF DIRECT MEASUREMENTS

A.N. Strelkov<sup>1</sup>, A.I. Ulitenko<sup>2</sup>

Ryazan Regional Clinical Hospital, Ryazan, Russia (1)  
Ryazan State Radioengineering University, Ryazan, Russia (2)

**Background.** An important role in the mechanism of the development and support of erection is assigned to the venous system of penis. At the same time, diacrisis and surgical correction of the disordered venous drainage is not successful in all cases. The rate of erection disorders is associated with various factors, but progressively grows with the age. **Aim.** To define the age-related dynamics of flexibility of the major venous vessel of penis – a deep dorsal vein – in a direct experiment. **Materials and methods.** Research was conducted on samples of a deep dorsal vein of penis obtained in autopsy of 30 males who have died suddenly from injuries or acute diseases at the age from 18 to 83 years. A deep dorsal vein of penis was isolated by an acute method without surrounding tissues. A fragment of the vein 2.5-3.5 cm in length was isolated distally the retaining ligament used as a reference point. In the course of experiments samples of veins were exposed to discretely increasing stretching force in the longitudinal direction with fixation of the corresponding absolute increments in the length on a specially designed installation using the original technique. **Results.** The mathematical analysis of the results of direct measurements of elastic properties of the studied vein permitted to reveal a considerable – about 20% – reduction in the elasticity of the vein in the studied age range 18 years – 83 years from  $\alpha_0 = 6,2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{N}$  to  $\alpha_0 = 5,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{N}$ . With increase in the force of load, the average value of vein elasticity rapidly declined, and asymptotically approached the established value of the order of  $\alpha = 1,4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{N}$ . Here, the age-related tendency to reduction in the elasticity with different degree of the functional load persists. **Conclusion.** The identified regularities of decline in the elasticity reflect changes in the wall of a deep dorsal vein with age that may play a role in the age-related increase in the rate of erectile dysfunction. The applied method of determination of elasticity can be used for determination of elasticity of vessels of other localizations and also of some other biological tissues in norm and pathology.

**Keywords:** deep dorsal vein, direct measurement of flexibility, mathematical analysis, erectile dysfunction.

Венозной системе полового члена отводится важная роль в механизме развития и поддержания эрекции [1]. Диагностика и хирургическая коррекция патологического венозного оттока оказывается успешной не во всех случаях [2]. Известно, что частота нарушений эрекции связана с различными факторами, но прогрессивно растет с увеличением возраста. Изучению изменений венозных сосудов различной локализации в норме и при патологии посвящено немало работ [3,4]. Однако, среди многочисленных исследо-

ваний в области флебологии нами не встречено публикаций, посвященных прямым измерениям упругости вен с количественной оценкой этого параметра [5].

В работах [6,7] авторами предложена физическая модель биологической ткани и метод её математического описания, позволивший установить снижение упругости белочной оболочки и кавернозных артерий полового члена с возрастом. Целью настоящего исследования явилось экспериментальное определение возрастной динамики упругости основного магистраль-

ного венозного сосуда полового члена – глубокой дорсальной вены (ГДВ).

### Материалы и методы

Исследования проводились на образцах ГДВ, полученных при аутопсии 30 лиц мужского пола, погибших внезапно от травм или острых заболеваний в возрасте от 18 до 83 лет. ГДВ полового члена выделяли острым путём без окружающих тканей из стандартного разреза, применяемого при аутопсии. Фрагмент вены длиной около 2,5-3,5 см выделяли дистальнее поддерживающей связки, которая служила ориентиром. Полученный материал транспортировался при строгом контроле условий поддержания необходимой влажности и температуры. Временной интервал от момента смерти до проведения исследований не превышал 18 часов.

В процессе экспериментов образцы вен подвергались воздействию дискретно возрастающей растягивающей силы  $F$  в продольном направлении с фиксацией соответствующих абсолютных приращений их длины  $\Delta l$  на специально спроектированной установке [6,7].

Последующая математическая обработка экспериментальных результатов заключалась в преобразовании массива дискретных данных в аналитические зависимости вида:

$$\frac{\Delta l}{l} = f\left(\frac{F}{S}\right), \quad (1)$$

где  $l$  и  $S$  – исходная длина и площадь поперечного сечения образцов.

Процесс преобразования осуществлялся с использованием общей аппроксимирующей функции [6]:

$$\frac{\Delta l}{l} = \left[ \frac{1}{a} + \frac{1}{b + c \frac{F}{S}} \right] \cdot \frac{F}{S}, \quad (2)$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  – постоянные коэффициенты, характеризующие свойства конкретного образца. Коэффициенты  $a$  и  $b$  имеют размерность модуля Юнга ( $\text{Н/м}^2$ ), коэффициент  $c$  – безразмерная величина.

Согласно определению понятия упругости  $\alpha$ , ее численное значение равно тангенсу угла наклона касательной к зависимости (2) и, следовательно, определяется выражением:

$$\alpha = \lim_{\Delta(F/S) \rightarrow 0} \frac{\Delta(\Delta l/l)}{\Delta(F/S)} = \frac{d(\Delta l/l)}{d(F/S)}. \quad (3)$$

Таким образом, после дифференцирования уравнения (2), получаем:

$$\alpha = \frac{1}{a} + \frac{b}{\left(b + c \frac{F}{S}\right)^2}. \quad (4)$$

Как видно, величина упругости не является константой, поскольку находится в существенной зависимости от силовой нагрузки  $F/S$ . Поэтому можно говорить лишь о ее исходном значении  $\alpha_0$ , как о некотором пределе, к которому стремится  $\alpha$  при  $F \rightarrow 0$ .

### Результаты и их обсуждение

Обработка экспериментальных данных осуществлялась в пакете расширения Curve Fitting Toolbox вычислительной среды Matlab и сводилась к определению коэффициентов  $a$ ,  $b$  и  $c$  в уравнении (2). Результаты аппроксимации, с указанием возраста, представлены в таблице 1. Приведенные здесь же значения величин достоверности аппроксимации R-square свидетельствуют о практически идеальном совпадении экспериментальных результатов с их представлением в аналитическом виде с помощью аппроксимирующей функции (2). Это также подтверждает справедливость вытекающего из нее соотношения (4), значительно расширяющего возможности анализа экспериментальных результатов.

Так, использование коэффициентов  $a$  и  $b$  позволяет рассчитать исходное (максимальное) значение упругости образцов  $\alpha_0$ , и установить ее зависимость от возраста. Результаты расчетов по формуле (4) представлены на рисунке 1.

Не менее информативным параметром является зависимость среднего значения упругости  $\bar{\alpha}_0$  от силовой нагрузки  $F/S$  (рис. 2), которая рассчитывалась по фор-

Таблица 1

*Результаты математической обработки экспериментальных данных*

№ образца	Возраст, лет	Коэффициенты			R-square	№ образца	Возраст, лет	Коэффициенты			R-square
		$a, \text{H/м}^2$	$b, \text{H/м}^2$	$c$				$a, \text{H/м}^2$	$b, \text{H/м}^2$	$c$	
1	44	$7,942 \cdot 10^7$	$2,373 \cdot 10^7$	10,891	0,9999	16	48	$8,132 \cdot 10^7$	$2,308 \cdot 10^7$	11,274	0,9998
2	50	$8,113 \cdot 10^7$	$2,391 \cdot 10^7$	12,063	0,9999	17	52	$7,655 \cdot 10^7$	$2,380 \cdot 10^7$	11,846	0,9997
3	48	$7,845 \cdot 10^7$	$2,550 \cdot 10^7$	11,812	0,9999	18	80	$8,968 \cdot 10^7$	$2,568 \cdot 10^7$	15,074	0,9998
4	79	$8,711 \cdot 10^7$	$2,672 \cdot 10^7$	15,121	0,9996	19	76	$8,891 \cdot 10^7$	$2,581 \cdot 10^7$	14,353	0,9997
5	43	$7,824 \cdot 10^7$	$2,252 \cdot 10^7$	10,731	0,9998	20	43	$7,673 \cdot 10^7$	$2,312 \cdot 10^7$	10,986	0,9993
6	53	$8,216 \cdot 10^7$	$2,442 \cdot 10^7$	12,345	0,9992	21	39	$7,424 \cdot 10^7$	$2,278 \cdot 10^7$	10,763	0,9994
7	81	$9,053 \cdot 10^7$	$2,680 \cdot 10^7$	15,447	1,0000	22	41	$7,846 \cdot 10^7$	$2,231 \cdot 10^7$	10,954	0,9998
8	81	$8,600 \cdot 10^7$	$2,420 \cdot 10^7$	14,981	0,9998	23	45	$7,653 \cdot 10^7$	$2,274 \cdot 10^7$	11,428	0,9999
9	66	$8,350 \cdot 10^7$	$2,280 \cdot 10^7$	13,322	0,9995	24	65	$8,521 \cdot 10^7$	$2,455 \cdot 10^7$	13,427	0,9999
10	75	$8,841 \cdot 10^7$	$2,615 \cdot 10^7$	14,915	0,9998	25	49	$7,623 \cdot 10^7$	$2,269 \cdot 10^7$	11,711	0,9997
11	83	$8,632 \cdot 10^7$	$2,640 \cdot 10^7$	15,552	0,9998	26	77	$8,210 \cdot 10^7$	$2,450 \cdot 10^7$	14,583	0,9998
12	36	$7,621 \cdot 10^7$	$2,278 \cdot 10^7$	10,514	0,9998	27	76	$8,411 \cdot 10^7$	$2,548 \cdot 10^7$	15,017	0,9999
13	56	$7,830 \cdot 10^7$	$2,310 \cdot 10^7$	12,315	0,9985	28	76	$8,773 \cdot 10^7$	$2,663 \cdot 10^7$	14,871	0,9998
14	61	$8,415 \cdot 10^7$	$2,420 \cdot 10^7$	12,942	0,9997	29	26	$7,156 \cdot 10^7$	$2,135 \cdot 10^7$	9,377	0,9987
15	67	$8,621 \cdot 10^7$	$2,519 \cdot 10^7$	13,907	0,9984	30	18	$6,952 \cdot 10^7$	$2,097 \cdot 10^7$	8,195	0,9994

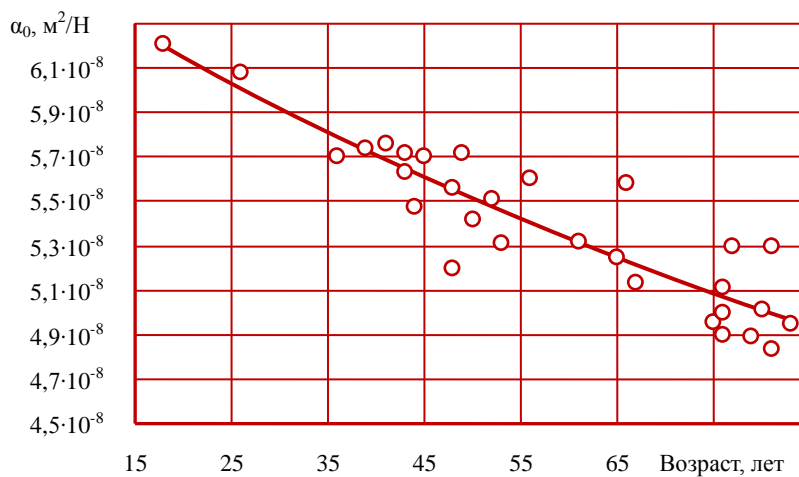


Рис. 1. Зависимость исходной упругости ГДВ от возраста

муле (4), исходя из средних значений коэффициентов  $\bar{a}$ ,  $\bar{b}$  и  $\bar{c}$ :

$$\bar{a} = \sum_{i=1}^N \frac{a_i}{N} = 8,150 \cdot 10^7 \text{ H/м}^2;$$

$$\bar{b} = \sum_{i=1}^N \frac{b_i}{N} = 2,413 \cdot 10^7 \text{ H/м}^2;$$

$$\bar{c} = \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{N} = 12,691,$$

где  $N=30$  – количество исследованных образцов.

Как следует из приведенных данных, исходное (максимальное) значение средней упругости  $\bar{\alpha}_0$  при  $F \rightarrow 0$  составляет порядка  $5,4 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/Н. С ростом силовой на-

грузки среднее значение упругости быстро убывает, асимптотически приближаясь к установившемуся значению порядка  $1,4 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/Н. При этом наиболее существенное изменение наблюдается при силовых нагрузках менее  $3 \cdot 10^6$  Н/м<sup>2</sup>.

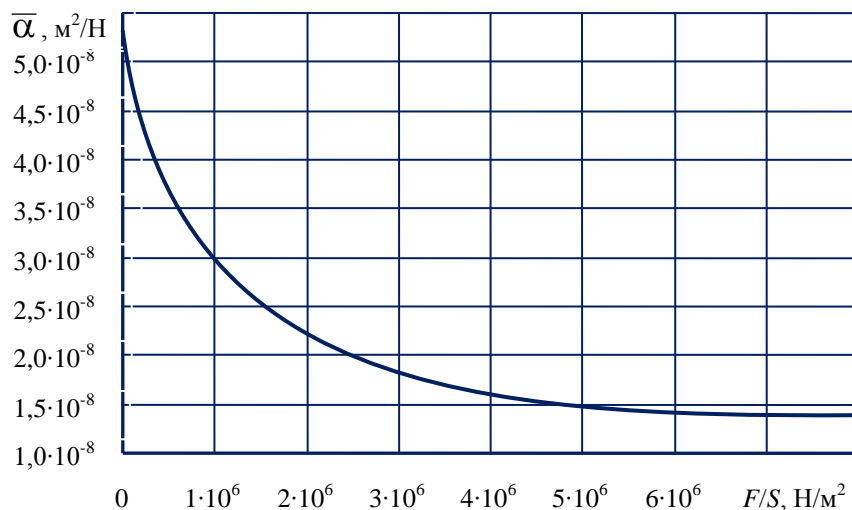


Рис. 2. Зависимость среднего значения упругости ГДВ от силовой нагрузки

Следует отметить, что результаты приведенных расчетов хорошо согласуются с результатами непосредственных экспериментов. В частности, они демонстрируют достаточно быстрый рост относительных приращений длины  $\Delta l/l$  при малых силовых нагрузках и их последующее снижение с плавным переходом к практически линейной зависимости от величины механического напряжения  $F/S$ .

Вены относят к «емкостным» сосудам, обеспечивающим депонирование большей части объема циркулирующей крови и ее возврат к сердцу. Это объясняет высокую упругость венозного сосуда в начале его заполнения и плавное снижение упругости по мере нарастания нагрузки. Тем не менее, при высоких нагрузках, вена способна выдерживать высокое давление в ней [3,4]. Полученные нами данные также подтверждают эту закономерность.

Примененный в работе математический анализ результатов прямых измерений упругих свойств ГДВ, позволил выявить существенное – около 20% – уменьшение упругости вены в исследуемом воз-

растном диапазоне 18 лет – 83 года с  $\alpha_0 = 6,2 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/Н до  $\alpha_0 = 5,0 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/Н. При увеличении функциональной нагрузки на вену упругость быстро снижается на начальном этапе, и практически не меняется, достигнув определенного насыщения. При этом сохраняется возрастная тенденция к снижению упругости при различной степени функциональной нагрузки.

Выявленные закономерности снижения упругости отражают изменения стенки вены с возрастом и могут играть определенную роль в возрастном увеличении частоты эректильной дисфункции. Полученные в работе данные дополняют наши знания об особенностях упругих свойств вен, а также о возрастных изменениях их функциональных свойств.

Использованный метод количественной оценки упругости вен может быть применен в решении других вопросов научной и клинической медицины.

### Выводы

1. Прямое измерение упругости глубокой дорсальной вены полового члена человека выявило снижение исходной уп-

ругости вены (упругость при малых силовых нагрузках) в возрастном диапазоне 18 – 83 года от  $\alpha_0 = 6,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{Н}$  до  $\alpha_0 = 5,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{Н}$ . Увеличение функциональной нагрузки на вену приводит к быстрому снижению упругости на начальном этапе, и

практически не меняется, достигнув определенного насыщения.

2. Предложенный метод определения упругости может быть использован для определения упругости сосудов другой локализации, а также других биологических тканей в норме и при патологии.

### Литература

1. Шахов Б.Е., Крупин В.Н. Диагностика эректильной дисфункции. Н. Новгород: НГМА, 2009.
2. Курбатов Д.Г., ред. Диагностика и лечение веногенной эректильной дисфункции. М.: Медпрактика-М, 2017.
3. Швальб П.Г., Ухов Ю.И. Патология венозного возврата из нижних конечностей. Рязань: РязГМУ, 2009.
4. Швальб П.Г., Стойко Ю.М., ред. Очерки терапевтической флебологии. Рязань: Узорочь, 2011.
5. Небылицин Ю.С., Назарук А.А. История развития флебологии. Ч. II // Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова. 2017. Т. 25, №3. С. 484-500. doi:10.23888/PAVLOVJ20173484-500
6. Улитенко А.И., Стрелков А.Н. Математическое описание возрастных изменений упругих свойств биологических тканей // Технологии живых систем. 2016. Т. 13, №2. С. 60-64.
7. Улитенко А.И., Стрелков А.Н. Возрастные изменения упругости кавернозных артерий // Биомедицинская радиоэлектроника. 2016. №6. С. 65-69.

### References

1. Shakhov BY, Krupin VN. *Diagnostika erektil'noy disfunktsii*. Nizhnij Novgorod: NGMA; 2009. (In Russ).
2. Kurbatov DG., editor. *Diagnostika i lecheniye venogennoy erektil'noy disfunktsii*. Moscow: Medpraktika-M; 2017. (In Russ).
3. Shval'b PG, Uhov JuI. *Patologija venoznogo vozvrata iz nizhnih konechnostej*. Rjazan: RjazGMU; 2009. (In Russ).
4. Shval'b PG, Stoyko JuM. *Oчерki terapevticheskoj flebologii*. Ryazan': Uzoroch'e; 2011. (In Russ).
5. Nebylitsin YuS, Nazaruk AA. History of phlebology (part II). *IP Pavlov Medical Biological Herald*. 2017;25(3):484-500. (In Russ). doi:10.23888/PAVLOVJ20173484-500
6. Ulitenko AI, Strelkov AN. Mathematical description of the age-related changes of the elastic properties of biological tissues. *Technologies of Living Systems*. 2016;13(2):60-4. (In Russ).
7. Ulitenko AI, Strelkov AN. Age-related changes of the cavernous artery flexibility. *Biomedicine Radioengineering*. 2016;6:65-9. (In Russ).

### Дополнительная информация [Additional Info]

**Источник финансирования.** ФГБОУ ВО Рязанский государственный радиотехнический университет. [Financial support. Budget of Ryazan State Radioengineering University.]

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, о которых необходимо сообщить, в связи с публикацией данной статьи. [Conflict of interests. The authors declare no actual and potential conflict of interests which should be stated in connection with publication of the article.]

**Участие авторов.** Стрелков А.Н. – концепция и дизайн исследования, сбор и обработка материала, статистическая обработка, написание текста, редактирование, Улитенко А.И. – сбор и обработка материала, статистическая обработка, написание текста. [Participation of authors. A.N. Strelkov – concept and design of the study, acquisition and processing of the material, statistical processing, writing the text, editing. A.I. Ulitenko – acquisition and processing of the material, statistical processing, writing the text.]

---

**Информация об авторах [Authors Info]**

\***Стрелков Алексей Николаевич** – к.м.н., врач-уролог, ГБУ РО Областная клиническая больница, Рязань, Россия. [**Alexey N. Strelkov** – MD, PhD, Urologist, Ryazan Regional Clinical Hospital, Ryazan, Russia]  
SPIN 3944-3061,  
ORCID ID 0000-0003-1761-0529,  
Researcher ID K-9450-2018.  
E-mail: anstrel11@yandex.ru

**Улитенко Александр Иванович** – д.т.н., профессор кафедры промышленной электроники ФГБОУ ВО Рязанский государственный радиотехнический университет, Рязань, Россия. [**Alexandr I. Ulitenko** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Industrial Electronics Department, Ryazan State Radioengineering University, Ryazan, Russia]  
SPIN 3004-9258,  
ORCID ID 0000-0002-9334-7489,  
Researcher ID L-1733-2018.

---

**Цитировать:** Стрелков А.Н., Улитенко А.И. Возрастная динамика упругости глубокой дорсальной вены полового члена человека по данным прямых измерений // Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова. 2018. Т.26, №2. С. 238-244. doi: 10.23888/PAVLOVJ2018262238-244.

**To cite this article:** Strelkov AN, Ulitenko AI. Age-related dynamics of **elasticity** of deep dorsal vein of human penis according to results of direct measurements. *I.P. Pavlov Medical Biological Herald*. 2018;26(2):238-44. doi: 10.23888/PAVLOVJ2018262238-244.

**Поступила/Received:** 15.10.2017  
**Принята в печать/Accepted:** 31.05.2018