

**О.Е. Холупко, М.С. Гриб**  
**ДЕФОРМАЦИЯ СОСУДИСТОЙ СТЕНКИ В МЕСТЕ СЛИЯНИЯ  
ПОЗВОНОЧНЫХ АРТЕРИЙ В БАЗИЛЯРНУЮ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ  
МОДУЛЯ УПРУГОСТИ СОСУДОВ, ВЯЗКОСТИ КРОВИ И СТРОЕНИЯ  
ЧЕРЕПА**

*Научный руководитель: канд. техн. наук, доц. В.А. Мансуров  
Кафедра медицинской и биологической физики  
Белорусский государственный медицинский университет, г. Минск*

**A.E. Khalupka, M.S. Hryb**  
**DEFORMATION OF THE VASCULAR WALL AT THE CONFLUENCE OF THE  
VERTEBRAL ARTERIES INTO THE BASILAR DEPENDING ON THE  
MODULUS OF ELASTICITY OF THE VESSELS, BLOOD VISCOSITY AND  
THE STRUCTURE OF THE SKULL**

*Tutor: PhD, associate professor V.A. Mansurov  
Department of Medical and Biological Physics  
Belarusian State Medical University, Minsk*

**Резюме.** Используя литературные данные, была установлена зависимость между различными заболеваниями сердечно-сосудистой системы и значениями модуля упругости Юнга стенок кровеносных сосудов, а также показателями вязкости крови.

**Ключевые слова:** упругость, вязкость, сосуды, заболевания.

**Resume.** Using the literature data, a correlation was established between various diseases of the cardiovascular system and the values of the Young's modulus of elasticity of the walls of blood vessels, as well as indicators of blood viscosity.

**Keywords:** elasticity, viscosity, vessels, diseases.

**Актуальность.** Деформация стенок сосудов является важным показателем при развитии патологий сердечно-сосудистой системы (ССС). Эта деформация зависит от модуля упругости сосудистой стенки, вязкости крови и геометрии строения сосудов. Исследование взаимосвязи данных компонентов может играть важную роль в диагностике ряда заболеваний, связанных с ССС. К примеру, пониженная вязкость крови может свидетельствовать о низком уровне эритроцитов, что может являться признаком анемии [6]. Установление точной зависимости может быть важно при диагностике тяжелых заболеваний ССС на ранних стадиях [5].

**Цель:** установить зависимость между модулем Юнга, вязкостью крови, абсолютной деформацией стенки сосуда и геометрией сосудов в месте слияния позвоночных артерий в базилярную при различных типах строения черепа, а также влияние на нее различных патологий.

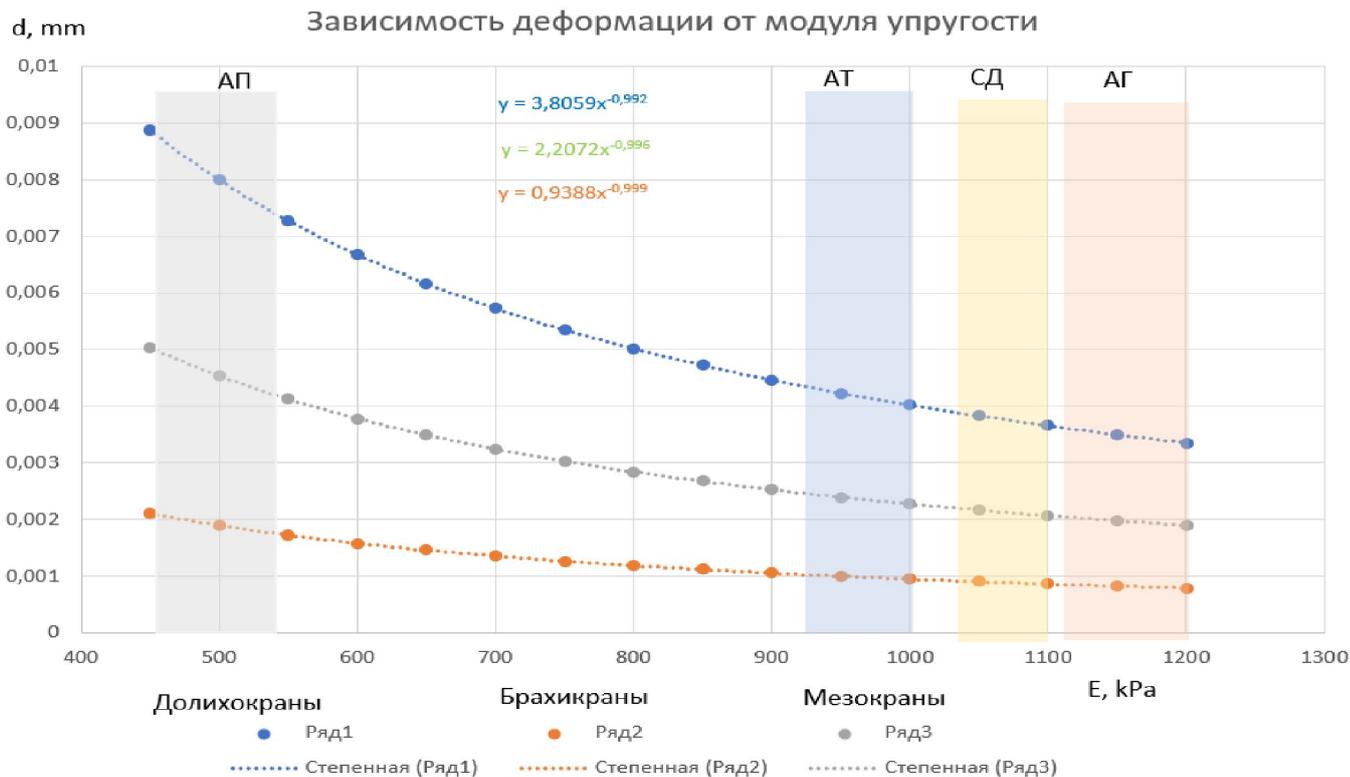
**Материал и методы.** Для расчетов использованы значения модуля упругости Юнга, вязкости крови, приведенные в научной литературе, освещающей патологию ССС. Методом конечно-разностного численного моделирования были произведены расчеты зависимости абсолютной деформации стенки сосуда для трех численных 3D моделей слияния позвоночных артерий в базилярную от модуля упругости. Числен-

ные значения геометрий для различных морфологических типов строения черепа слияния позвоночных артерий в базилярную были предоставлены кафедрой Нормальной анатомии БГМУ.

**Результаты и их обсуждение.** По литературным данным для атеросклероза значение модуля равно  $881 \pm 239$  кПа. Это связано с тем, что в месте формирования атеросклеротической бляшки из-за воздействия сдвиговой деформации могут формироваться микротрещины, надрывы и кровоизлияния, что приводит к замещению поврежденных участков фиброзной тканью. Атеросклеротическое поражение артериальной стенки детерминирует инициацию и прогрессирование комплекса патогенетически взаимосвязанных реакций, которые на уровне сосуда как органа формируют специфический паттерн ремоделирования [2]. Для артериальной гипертензии (АГ) модуль Юнга равен  $1152,9 \pm 62,99$  кПа, что обусловлено увеличением толщины комплекса интима-медиа за счет утолщения эндотелия, усиленной миграции фибробластов и гладкомышечных клеток в среднюю оболочку артерии, накопления внеклеточного матрикса вследствие измененной функциональной активности металлопротеиназ [4]. для ишемической болезни сердца и сахарного диабета 2 типа модуль упругости в среднем равен 970 кПа, что опять-таки связано с ремоделированием сосудистой стенки. В ряде источников указывается на возможную кальцификацию интима-медиа при сахарном диабете [3]. Коморбидность синдрома обструктивного апноэ сна (СОАС) и АГ. Для последних патологий модуль упругости в среднем равен 453 кПа. Это обусловлено процессами ремоделирования сосудистой стенки ввиду нарушения функции эндотелиоцитов и гладкомышечных клеток из-за гипоксии, а также утолщением артерии из-за фиброзных и кальцинозных изменений [1]. Данные представлены ниже (таблица 1, график 1).

**Табл. 1.** Значения абсолютной деформации стенки сосуда при различных заболеваниях

Заболевание	Атеросклероз	Артериальная гипертензия (АГ)	Ишемическая болезнь сердца	Сахарный диабет 2 типа	Коморбидность синдрома обструктивного апноэ сна (СОАС) и АГ
Средний модуль упругости Юнга, кПа	881±239	1152,9±62,99	970		454
Абсолютная деформация, мм	0,00455838	0,00349144	0,00414263		0,00879159



**Граф. 1** – Зависимость абсолютной деформации стенки сосуда от модуля упругости при различных типах строения черепа

Максимальная абсолютная деформация возникает в области слияния указанных сосудов. Стенка сосуда в этом месте вытягивается в одном направлении и сжимается в другом, так как в случае сложной геометрии эти деформации могут быть несимметричны. Объяснить выпячивание стенки можно суммированием динамического давления при взаимодействии двух потоков в формуле 1:

$$p_d = \frac{\rho v^2}{2}, \quad (1)$$

$\rho$  – плотность жидкости;

$v$  – скорость жидкости в данной точке.

Уменьшение вязкости приводит к увеличению скорости течения при заданном перепаде давления в сосудах и, следовательно, к увеличению динамического давления в указанном месте. В результате исследования установлено, что при увеличении вязкости крови абсолютная деформация стенки сосуда уменьшается.

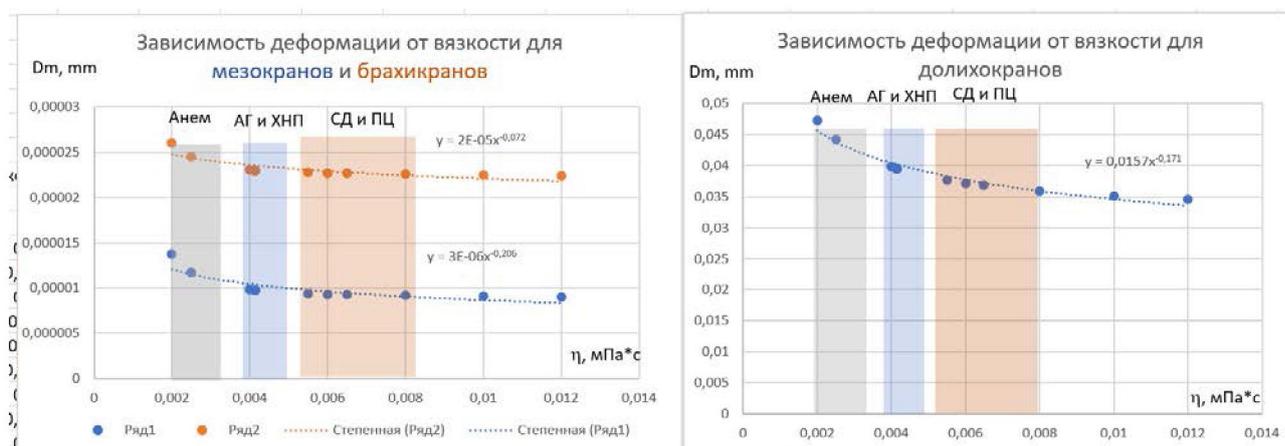
Дополнительно были рассчитаны значения абсолютной деформации стенки сосуда при таких заболеваниях, как анемия, сахарный диабет, артериальная гипертензия, полицитемия и хроническая почечная недостаточность (ХПН) (таблица 2).

**Табл. 2.** Значения абсолютной деформации стенки сосуда при различных заболеваниях

Заболевание	Анемия	Сахарный диабет 2 типа	Полицитемия	ХПН	АГ
Средняя вязкость крови, мПа*с	2,50	5,50	6,50	4,12	4,15
Абсолютная деформация, мм	0,0442532	0,0376825	0,0368118	0,0395792	0,0395251

Изменение вязкости крови при ХПН происходит из-за симптомов дегидратации вследствие компенсаторной полиурии. При сахарном диабете 2 типа вязкость повышается из-за повышенной концентрации глюкозы в крови, что вызывает снижение эластических свойств эритроцитов [1].

Дополнительно установлена нелинейная обратная зависимость между абсолютной деформацией стенки сосуда и вязкостью крови для слияния позвоночных артерий в базилярную для всех типов строения черепа (график 2).



**Граф. 2** – Зависимость абсолютной деформации стенки сосуда от вязкости крови при различных типах строения черепа

**Выводы:** по литературным данным обнаружена взаимосвязь между увеличением модуля Юнга и развитием ряда заболеваний ССС. Установлена нелинейная обратная зависимость между абсолютной деформацией стенки сосуда и модулем упругости для слияния позвоночных артерий в базилярную для всех типов строения черепа. Выявлено, что изменения вязкости крови при патологиях приводят к изменению абсолютной деформации стенки сосуда. Получены эмпирические формулы этих зависимостей.

### Литература

1. Бродовская, Т. О. Дуэт синдромов-обструктивного апноэ сна и артериальной гипертензии. Фокус на раннее сосудистое старение / Т. О. Бордовская // Практическая медицина. – 2019. – Т. 17. – №. 2. – С. 37-41.
2. Бондарь, Т. П., Петровский, С. А. Взаимосвязь вязкости крови и биофизических свойств мембраны эритроцитов у больных сахарным диабетом 2 типа / Т. П. Бондарь, С. А. Петровский // Наука. Инновации. Технологии. – 2015. – №. 2. – С. 172-178.

3. Генкель, В. В. Эндотелиальная скорость сдвига и сосудистая жесткость на локальном и регионарном уровнях у пациентов на разных стадиях атерогенеза / В. В. Генкель // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2016. – Т. 15. – №. 3. – С. 50-56.

4. Генкель, В. В. Локальная и регионарная сосудистая жесткость у пациентов с ишемической болезнью сердца и сахарным диабетом типа 2 с повышенными значениями лодыжечно-плечевого индекса / В. В. Генкель // Сибирское медицинское обозрение. – 2017. – №. 2 (104). – С. 41-47.

5. Оттева, Э. Н. Артериальная ригидность—маркер развития сердечно-сосудистых заболеваний / Э. Н. Оттева // Клиническая медицина. – 2012. – Т. 90. – №. 1. – С. 4-12.

6. Сидорук, С. П. Анемия при сердечно-сосудистых заболеваниях / С. П. Сидорук, Е. Б. Петрова, Н. П. Митьковская. – 2017.

7. Шаманаев, А. Ю. Синдром повышенной вязкости крови у больных артериальной гипертензией и гемореологические эффекты антигипертензивных средств / А. Ю. Шаманаев // Российский кардиологический журнал. – 2016. – №. 4 (132).