

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗНЫХ ТИПОВ СТРУКТУРНЫХ КОМПОНЕНТОВ (БИЮНИТОВ) ВНУТРИОРГАННОГО ВЕНОЗНОГО РУСЛА СЕЛЕЗЕНКИ В НОРМЕ

© Дадашев А.Ш.¹, Зенин О.К.², Милтых И.С.³, Батаев Х.М.¹, Вагабов И.У.¹, Кафаров Э.С.¹, Яшина И.Н.⁴

¹ Чеченский государственный университет имени А.А. Кадырова (ЧГУ)

Россия, 364093, Чеченская Республика, г. Грозный, ул. Шерипова, д. 32

² Пензенский государственный университет (ПГУ)

Россия, 440026, Пензенская область, г. Пенза, ул. Красная, д. 40

³ Университет Палермо

61, Piazza Marina, 90133, Palermo, Italy

⁴ Курский государственный медицинский университет (КГМУ)

Россия, 305041, Курская область, г. Курск, ул. К. Маркса, д. 3

Цель – установить функциональные (проводящая, дренирующая, опорная) особенности разных типов структурных компонентов (биюнитов) внутриорганных венозных русел селезенки (ВВРС) путем их численного моделирования, основанного на результатах морфометрии.

Материалы и методы. В качестве объектов для исследования использовали виртуальные (цифровые) модели разного типа биюнитов ВВРС, основанные на ранее полученных их морфометрических характеристиках. Выделяли биюниты ВВРС 4 типов: 1 тип – полная асимметрия, диаметр проксимального сегмента (D) не равен диаметрам большего (d_{max}) и меньшего (d_{min}) дистального сегмента D≠d_{max}≠d_{min}, 2 тип – боковая асимметрия, D=d_{max}, D≠d_{min}, 3 тип – односторонняя симметрия, D≠d_{max}, d_{min}=d_{max}, 4 тип – полная симметрия, D=d_{max}=d_{min}. Для анализа проводящей функции (гемодинамического сопротивления) и опорной (жесткость конструкции) виртуальных моделей биюнитов ВВРС разного вида применяли компьютерную программу ANSYS Student. Анализ дренирующей функции виртуальных моделей разного вида биюнитов ВВРС проводили с использованием компьютерной программы Vasculograph.

Результаты. Установлено, что в направлении увеличения значения показателя, характеризующего 1) гемодинамическое сопротивление, биюниты ВВРС разного типа расположились следующим образом: 1-го типа, 2-го типа, 3-го типа и 4-го типа; 2) дренирующую функцию: 4-го типа, 2-го типа, 3-го типа и 3) опорную функцию: 4-го типа, 3-го типа, 2-го типа и 1-го типа.

Заключение. Разного типа биюниты ВВРС в неравной степени принимают участие в выполнении проводящей, дренирующей и опорной функций. Основная роль в выполнении функций по проведению крови, дренированию ткани селезенки и созданию «мягкого скелета» органа принадлежит биюнитам ВВРС 1-го типа. В качестве морфометрического эталона нормы ВВРС можно использовать морфометрические характеристики биюнитов 1-го типа.

Ключевые слова: селезенка; морфометрия; венозное русло; структурный компонент – биюнит.

Дадашев Али Шарудневич – аспирант кафедры «Нормальная и топографическая анатомия с оперативной хирургией», ассистент, ЧГУ, г. Грозный. ORCID iD: 0000-0001-8502-0841. E-mail: mukulatura95@mail.ru

Зенин Олег Константинович – д-р мед. наук, профессор; профессор кафедры «Анатомия человека», ПГУ, г. Пенза. ORCID iD: 0000-0002-5447-1989. E-mail: zen.olegz@gmail.com (автор, ответственный за переписку)

Милтых Илья Сергеевич – магистрант, Университет Палермо. ORCID iD: 0000-0002-9130-3255. E-mail: contact@miltykh.com

Батаев Хизир Мухидинович – д-р мед. наук, профессор; зав. кафедрой факультетской терапии ЧГУ, г. Грозный. ORCID iD: 0000-0003-3213-6474. E-mail: hizir62@mail.ru

Вагабов Ислам Узгенбайевич – канд. мед. наук; ст. преподаватель кафедры «Нормальная и топографическая анатомия с оперативной хирургией», ЧГУ, г. Грозный. ORCID iD: 0000-0002-6033-8148. E-mail: malsi_85@mail.ru

Кафаров Эдгар Сабирович – д-р мед. наук, доцент, зав. кафедрой «Нормальная и топографическая анатомия с оперативной хирургией», ЧГУ, г. Грозный. ORCID iD: 0000-0001-9735-9981. E-mail: Edgar-kafarov@yandex.ru

Яшина Ирина Николаевна – д-р мед. наук, доцент, профессор кафедры анатомии человека, КГМУ, г. Курск. ORCID iD: 0000-0001-6235-2309. E-mail: bik2709@rambler.ru

Несмотря на большое количество научных работ, посвященных исследованию сосудистого русла селезенки, остается немало нерешенных проблем [1-4]. Например, объективная диагностика отклонений от нормального строения внутриорганных венозных русел селезенки (ВВРС), органосберегающая резекция ткани селезенки, прогнозирование исходов ангиопластических операций сосудистого русла этого органа.

Сложность и изменчивость сосудов селезенки добавляют проблем при хирургическом вмешательстве. Последнее еще больше усугубляется трудностью остановки кровотечения после повреждения ткани органа, что требует высококвалифицированного хирургического навыка для этих процедур, а также глубокого понимания морфологии ВВРС [5-10].

К сожалению, традиционная – описательная анатомия не может адекватно ответить на все эти вызовы. В настоящее время в анатомии сформировалось перспективное направление исследования внутриорганных сосудистых русел как концептуальных моделей (сегментарная, стволовая, бифуркационная) [11]. Такой подход позволяет представлять информацию об исследуемом сосудистом дереве в цифровом виде, что в будущем даст возможность сознания морфометрического эталона и на его базе цифрового морфологического критерия нормального строения. Наибольшее распространение получила бифуркационная модель, когда сосудистое русло представляют отдельные екомпоненты – бифуркации, которая включает в себя один проксимальный, два дистальных сосудистых сегмента и точку их объединения [12-15]. Как правило, такой подход используют при описании артериального дерева. Морфометрическому исследованию ВВРС посвящено значительно меньше работ, чем артерльному, несмотря на очевидную важность венозного звена для нормального функционирования селезенки.

В работе [16] приведено детальное количественное описание структуры ВВРС как концептуальной дихотомической (бифуркационной модели), состоящей из венозных бионитов (по аналогии с артериальными бифуркациями) разного типа. Приводятся рассуждения о различной функциональной роли разных типов бионитов ВВРС и попытки определения морфологического эталона его нормального строения. Основным недостатком данного исследования является отсутствие анализа функциональной роли бионитов ВВРС разного типа, что не позволяет определить, какие из них можно рассматривать в качестве потенциальных объектов для определения морфометрического эталона нормы. Восполнить этот пробел призвана настоящая работа.

Цель – установить функциональные (проводящая, дренирующая, опорная) особенности разных типов структурных компонентов (бионитов) ВВРС путем их численного моделирования, основанного на результатах морфометрии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов для исследования использовали виртуальные (цифровые) модели разного типа структурных компонентов (бионитов) ВВРС (рис. 1, табл. 1), основанные на ранее полученных их морфометрических характеристиках [16, 17]. Выделяли биониты ВВРС 4 типов (табл. 1): 1 тип – полная асимметрия, диаметр проксимального сегмента (D) не равен диаметрам большего (dmax) и меньшего (dmin) дисталь-

ного сегмента $D \neq d_{\max} \neq d_{\min}$, 2 тип – боковая асимметрия, $D = d_{\max}$, $D \neq d_{\min}$, 3 тип – односторонняя симметрия, $D \neq d_{\max}$, $d_{\min} = d_{\max}$, 4 тип – полная симметрия, $D = d_{\max} = d_{\min}$.

Для анализа проводящей функции (гемодинамического сопротивления) виртуальных моделей бионитов ВВРС разного типа применяли компьютерную программу ANSYS Student (рис. 1). Стенки венозных сегментов считались неупругими. Для численного моделирования нестационарного ламинарного потока применяли уравнения непрерывности и уравнения Навье-Стокса. Считали, что коэффициент вязкости не является константой, а зависит от градиента скорости сдвига. Кровь рассматривали как неньютоновскую жидкость с плотностью 1060 кг/м³ и динамической вязкостью, изменяющейся согласно модели Карро [18]. Для моделирования взаимосвязи скорости и давления применяли систему PISO [19]. Скорость на входе являлась постоянной и составила 0,14 м/с для ВВРС [20]. Систолическое давление здорового человека составляет около 120 мм рт. ст., а диастолическое давление здорового человека – около 80 мм рт. ст. В данной модели используется среднее давление двух фаз – 100 мм рт. ст. (около 13332 Па) в качестве статического манометрического давления на выходе. Показатель сопротивления определяли как отношение разности давления на входе и выходе к сумме длин сегментов бионита:

$$Z = P_{\max} - P_{\min}[\text{Па}] / L + l_{\max} + l_{\min}[\text{м}] \quad (1)$$

Для анализа дренирующей функции виртуальных моделей разного типа бионитов ВВРС применяли компьютерную программу Vasculograph [21] (рис. 1). В качестве показателя, количественно характеризующего дренирующую функцию бионита ВВРС, использовали величину площади области покрытия (ПОП), т.е. области, которую занимает исследуемый бионит. Значение показателя ПОП рассчитывали как произведение величин ширины и длины ПОП (мм²).

Для анализа опорной функции виртуальных моделей бионитов ВВРС разного типа применяли компьютерную программу ANSYS Student (рис. 1). Определяли величину жесткости конструкции бионита. В качестве показателя жесткости конструкции бионита ВВРС рассчитывали величину (R_b), равную отношению значения (F_b) собственного веса и веса крови, которая находится у него внутри, к величине (Δ) перемещения наиболее удаленной точки бионита $R_b = F_b / \Delta$ (Н/м). Собственный вес (F_e) бионита определяли как $F_e = m_{\text{бионит}} \times g$, $m_{\text{бионит}}$ равна сумме масс сегментов его составляющих, где масса сегмента $m_{\text{сегмент}} = \pi(D \times h + h^2) L$ (D – внутренний диаметр венозного сегмента; L – длина венозного сегмента; h – толщина стенки венозного сегмента),

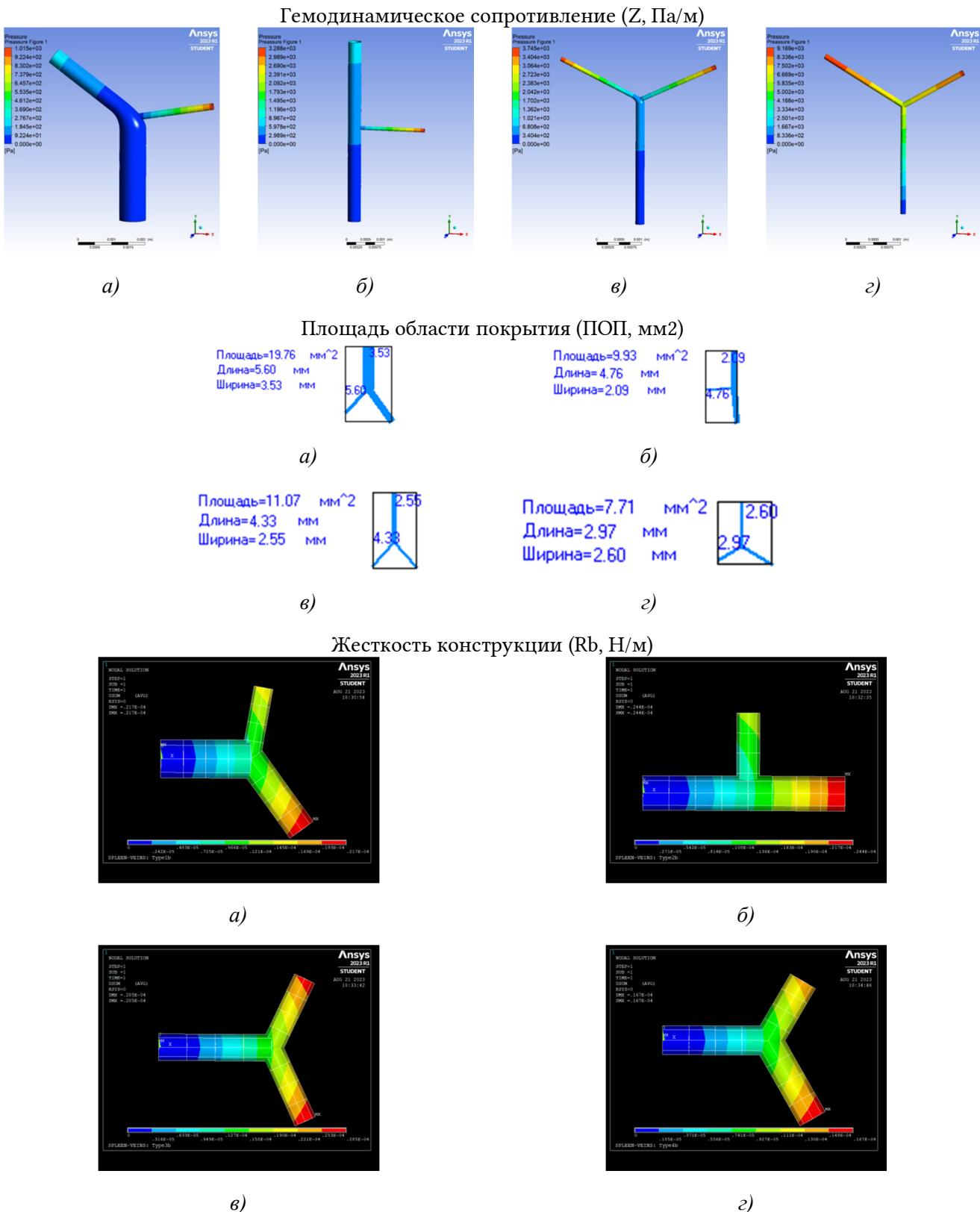


Рис. 1. Результаты виртуальных испытаний проводящей (Z), дренирующей (ПОП) и опорной (Rb) функций биунитов ВВРС разных типов: а) 1 тип – полная асимметрия, диаметр проксимального сегмента (D) не равен диаметрам большего (d_{max}) и меньшего (d_{min}) дистального сегмента D≠d_{max}≠d_{min}; б) 2 тип – боковая асимметрия, D=d_{max}, D≠d_{min}; в) 3 тип – односторонняя симметрия, D≠d_{max}, d_{min}=d_{max}; г) 4 тип – полная симметрия, D=d_{max}=d_{min}.

Fig. 1. Results of virtual tests of conductive (Z), draining (POP) and pillar (Rb) functions of biounites of different types of splenic venous vasculature: a) type 1 – complete asymmetry, proximal segment diameter (D) is not equal to the diameters of the larger (d_{max}) and smaller (d_{min}) distal segment D≠d_{max}≠d_{min}; b) type 2 – lateral asymmetry, D=d_{max}, D≠d_{min}; c) type 3 – unilateral symmetry, D≠d_{max}, d_{min}=d_{max}; d) type 4 – complete symmetry, D=d_{max}=d_{min}.

Таблица 1

Table 1

Величины показателей, характеризующих морфометрические и функциональные (проводящая, дренирующая, опорная) особенности биунитов ВВРС разного типа (n=67)

Values of parameters characterising morphometric and functional (conducting, draining, pillar) properties of different types of splenic venous biunites (n=67)

Показатель Indicator	Значение показателя (N, относительное количество биунитов) Indicator value (N, relative number of units)			
	Биунит 1-го типа (N=55%) Type 1 biunit (N=55%)	Биунит 2-го типа (N=5%) Type 2 biunit (N=5%)	Биунит 3-го типа (N=38%) Type 3 biunit (N=38%)	Биунит 4-го типа (N=2%) Type 4 biunit (N=2%)
Величины морфометрических показателей (Ме) Morphometric values (Me)				
D, мм / mm	0.8	0.35	0.20	0.10
dmax, мм / mm	0.5	0.35	0.10	0.10
dmin, мм / mm	0.2	0.1	0.10	0.10
L, мм / mm	3.10	2.50	2.80	2.00
lmax, мм / mm	3.00	2.30	2.00	1.70
lmin, мм / mm	2.50	1.90	1.90	1.30
Величины показателей, характеризующих проводящую, дренирующую и опорную функции Values of indicators characterizing conducting, draining and supporting functions				
Z, Па/м / Pa/m	117986	490740	558882	1833888
ПОП, мм ² / mm ²	19.76	9.93	11.07	7.71
Rb, Н/м / N/m	3176.9	1111.6	468.1	415.9

Примечание: D – диаметр проксимального сегмента; dmax – диаметр большего дистального сегмента; dmin – диаметр меньшего дистального сегмента; L – длина проксимального сегмента; lmax – длина большего дистального сегмента; lmin – длина меньшего дистального сегмента; Z – показатель гемодинамического сопротивления; ПОП – площадь области покрытия; Rb – показатель жесткости конструкции; N – относительное количество биунитов; n – количество исследованных коррозионных препаратов.

Note: D – diameter of the proximal segment; dmax – diameter of the larger distal segment; dmin – diameter of the smaller distal segment; L – length of the proximal segment; lmax – length of the larger distal segment; lmin – length of the smaller distal segment; Z – indicator of hemodynamic resistance; POP – area of the coating area; Rb – indicator of structural rigidity; N – relative number of biunites; n – number of corrosion preparations studied.

собственный вес и вес крови (Fb) внутри биунита определяли как $Fb = g(m_{\text{биунит}} + m_{\text{крови}})$. Массу крови $m_{\text{крови}}$, находящейся внутри биунита, определяли как сумму масс крови находящихся в каждом из его сегментов, где $m_{\text{крови}} = 1060\pi D^2/4$; 1000 кг/м³ – плотность воды, 1060 кг/м³ – плотность крови. Толщину стенки венозного сегмента биунита ВВРС рассчитывали в соответствии с формулой [22]:

$$h = 0,09D + 0,44 \quad (2),$$

где D – диаметр венозного сегмента биунита ВВРС.

Для оценки механических свойств биунита ВВРС принимали модуль Юнга, равный 8,5×105 Па для каждого сосудистого сегмента, составляющего биунит [23]. Этот параметр позволил оценить упругие свойства венозных биунитов, входящих в состав ВВРС, и определить их способность выдерживать механические нагрузки в условиях нормального функционирования. Значения углов биунита ВВРС между проксимальным и дистальными сегментами ($\alpha_{\text{ах}}$ и

$\alpha_{\text{мин}}$) рассчитывали, используя уравнения Murray C.D. [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования функциональных (проводящая, дренирующая, опорная) особенностей биунитов ВВРС разного типа приведены на рис. 1 и в табл. 1.

Как следует из таблицы 1, в структуре ВВРС в наибольшем относительном количестве представлены биуниты 1-го типа (55%), в наименьшем – биуниты 4-го типа (2%). Относительное количество биунитов 3-го типа – 38%, а 2-го типа – 5%. Известно, что в основе практически всех медицинских исследований, направленных на поиск «нормы» строения и функционирования человеческого организма в целом, его систем и их структурных компонентов, в нашем случае – биунитов ВВРС, лежит аксиома о том, что нормальные (оптимальные) объекты (случаи) со-

ставляют большинство от всех исследуемых объектов (случаев) исходя из формального предположения о том, что они наилучшим образом приспособлены к данным условиям существования [15]. Таким образом поиски морфометрического эталона нормы следует проводить, исследуя величины количественных показателей, характеризующих особенности структуры бионитов BBPC 1-го и 3-го типов как предположительно наиболее оптимальных (нормальных).

Ранее [16] путем сравнительного анализа величин изучаемых морфометрических показателей бионитов BBPC разного типа было установлено, что в порядке убывания значений медианы диаметра (D , мм) проксимального сегмента биониты расположились следующим образом: 1-го типа ($D = 0,8$ мм), 2-го типа ($D = 0,35$ мм), 3-го типа ($D = 0,20$ мм), 4-го типа ($D = 0,10$ мм), а значения медианы длины проксимального сегмента (L , мм) – 1-го ($L = 3,10$ мм), 3-го ($L = 2,80$ мм), 2-го ($L = 2,50$ мм) и 4-го ($L = 2,00$ мм). Определение массы бионитов BBPC разного типа позволило установить, что в порядке убывания массы биониты расположились следующим образом: 1-го типа ($m = 0,00031$ кг), 2-го типа ($m = 0,00007$ кг), 3-го типа ($m = 0,00002$ кг) и 4-го типа ($m = 0,00001$ кг). Как видно, наибольшей массой обладают биониты 1-го типа, наименьшей – 4-го типа. Вильгельм Ру (Roux W.) [12] и Сесил Мюррей (Murray C.D.) [13, 14] считали, что нормальное (оптимальное) сосудистое русло состоит из отдельных структурных компонентов, построенных в соответствии с принципом «минимальных затрат», т.е. затрат биологического материала, израсходованного на их построение, и минимальной работы, необходимой для продвижения по ней крови. Поэтому в качестве кандидата в «наиболее оптимальные» (нормальные) типы бионитов, с этой точки зрения, лучше всего подходят биониты 4-го типа, т.к. они имеют наименьшую массу. Однако это предположение противоречит ранее сказанному о том, что наиболее оптимальные конструктивные компоненты должны составлять относительное большинство. Полученные данные, вероятно, обусловлены особенностями морфометрического исследования [16], результаты которого легли в основу настоящей работы. Речь идет о «краевых эффектах» – авторская терминология. Последнее связано с тем, что одна часть данной группы, очевидно, имела «корни» (притоки), однако погрешности методики привели к потере данных. Другая часть сосудов действительно могла представлять собой начальные дистальные сегменты (в рамках возможностей методики).

Далее в ходе сравнительного исследования было установлено, что в направлении увеличения значения показателя гемодинамического сопротивления и, следовательно, уменьшения величины показателя, характеризующего проводящую способность, биониты BBPC разного типа расположились следующим образом: 1-го типа ($Z = 117986$ Па/м), 2-го типа $Z = 490740$ Па/м), 3-го типа ($Z = 558882$ Па/м) и 4-го типа ($Z = 1833888$ Па/м). Значение показателя, характеризующего проводящую способность бионитов BBPC разного типа, максимально у бионита 1-го типа и минимально у бионита 4-го типа. Приведенные факты говорят о том, что наиболее оптимальными являются биониты BBPC 1-го типа, а не 4-го. Т.к., следуя принципу «минимальности затрат», оптимальные (нормальные) биониты BBPC должны иметь наилучшую проводящую способность [24].

В порядке дискуссии. Умозрительно было сделано предположение, что функции BBPC не ограничиваются только проведением крови с минимальными затратами. Венозное русло селезенки и его биониты служат также для дренирования максимально возможного объема ткани селезенки и создания «мягкого скелета» органа [25, 26]. Т.е. кроме проводящей биониты выполняют еще дренирующую и опорную функции. В направлении убывания величины ПОП – показателя, характеризующего дренирующую функцию, биониты BBPC разного типа расположились следующим образом: 1-го типа ($\text{ПОП} = 19,76$ мм²), 3-го типа ($\text{ПОП} = 11,07$ мм²), 2-го типа ($\text{ПОП} = 9,93$ мм²) и 4-го типа ($\text{ПОП} = 7,71$ мм²). Значение показателя, характеризующего дренирующую функцию максимально у бионитов BBPC 1-го типа и минимально у бионитов BBPC 4-го типа. В порядке убывания значения показателя, характеризующего опорную функцию (жесткость конструкции), биониты BBPC разного типа расположились следующим образом: 1-го типа ($R_b = 3176,9$ Н/м), 2-го типа ($R_b = 1111,6$ Н/м), 3-го типа ($R_b = 468,1$ Н/м) и 4-го типа ($R_b = 415,9$ Н/м). Т.е. максимальное значение показателя жесткости конструкции у бионитов BBPC 1-го типа, минимальное – 4-го типа.

Приведенные факты позволяют считать биониты BBPC 1-го типа наиболее оптимальными (нормальными), т.к. значения показателей, характеризующих проводящую, дренирующую и опорную функции, у них максимальны в сравнении с величинами соответствующих показателей остальных исследуемых типов бионитов BBPC.

Таким образом, мы пришли к следующим выводам:

1. Разного типа биониты ВВРС в неравной степени принимают участие в выполнении проводящей, дренирующей и опорной функций.

2. Основная роль в выполнении функций по проведению крови, дренированию ткани селезенки и созданию «мягкого скелета» селезенки принадлежит бионитам ВВРС 1-го типа.

3. В качестве морфометрического эталона нормы ВВРС можно использовать морфометрические характеристики бионитов 1-го типа.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

СООТВЕТСТВИЕ ПРИНЦИПАМ ЭТИКИ

Данное исследование было одобрено Местным этическим комитетом Медицинского института Чеченского государственного университета имени А.А. Кадырова (протокол № 258/24-77 от 16 октября 2023 г.).

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Дадашев А.Ш. – сбор и анализ данных, написание статьи; Милтых И.С. – статистический анализ, подготовка текста статьи, научное и техническое редактирование; Зенин О.К. – разработка концепции и дизайна исследования, критический пересмотр рукописи с внесением ценного интеллектуального содержания; Батаев Х.М., Кафаров Э.С. – разработка концепции и дизайна исследования; Вагабов И.У. – сбор и анализ данных; Яшина И.Н. – критический пересмотр рукописи с внесением ценного интеллектуального содержания.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Jones C. *Surgery of the spleen. Surgery (Oxford)*. 2022;40(4):274-276. DOI: 10.1016/j.mpsur.2022.01.006.
2. Lee J.E., Cho J.S., Shin K.S., Kim S.S., You S.K., Park J.W., Shin H.S., Yoon Y.C. Diffuse Infiltrative Splenic Lymphoma: Diagnostic Efficacy of Arterial-Phase CT. *Korean Journal of Radiology*. 2016;17(5):734-741. DOI: 10.3348/kjr.2016.17.5.734.
3. Asaadi S., Martins K.N., Lee M.M., Pantoja J.L. Artificial intelligence for the vascular surgeon. *Seminars in Vascular Surgery*. 2023;36(3):394-400. DOI: 10.1053/j.semvascsurg.2023.05.001.
4. Lareyre F., Yeung K.K., Guzzi L., Di Lorenzo G., Chaudhuri A., Behrendt C.A., Spanos K., Raffort J. Artificial intelligence in vascular surgical decision making. *Seminars in Vascular Surgery*. 2023;36(3):448-453. DOI: 10.1053/j.semvascsurg.2023.05.004.
5. Miltykh I., Kafarov E.S., Covantsev S., Dadashev A.S., Skarlis A.A., Zenin O.K. A new dimension in medical education: Virtual reality in anatomy during COVID-19 pandemic. *Clinical Anatomy*. 2023;36(7):1007-1015. DOI: 10.1002/ca.24098.
6. Ishikawa Y., Ehara K., Yamada T., Matsuzawa N., Arai S., Ban D., Kudo A., Tanabe M., Kawashima Y., Sakamoto H. Three-dimensional computed tomography analysis of the vascular anatomy of the splenic hilum for gastric cancer surgery. *Surgery Today*. 2018;48(9):841-847. DOI: 10.1007/s00595-018-1679-y.
7. Bokor-Billmann T., Billmann F. *Spleen*. In: Billmann F., Keck T., eds. *Essentials of Visceral Surgery: For Residents and Fellows*. Springer; 2023:281-292. DOI: 10.1007/978-3-662-66735-4_11.
8. Wiik Larsen J., Søreide K., Søreide J.A., Tjosevik K., Kvaløy J.T., Thorsen K. Epidemiology of abdominal trauma: An age- and sex-adjusted incidence analysis with mortality patterns. *Injury*. 2022;53(10):3130-3138. DOI: 10.1016/j.injury.2022.06.020.
9. Fredericks C.J., Galante J.M. Splenic injuries. In: Asensio JA, Meredith JW, eds. *Current Therapy of Trauma and Surgical Critical Care (Third Edition)*. Elsevier; 2024:398-405. DOI: 10.1016/B978-0-323-69787-3.00068-X.
10. Savage S.A. Management of blunt splenic injury: down the rabbit hole and into the bucket. *Trauma Surg Acute Care Open*. 2023;8(Suppl 1):e001119. DOI: 10.1136/tsaco-2023-001119.
11. Зенин О.К., Кафаров Э.С., Косников Ю.Н., Байсултанов И.Х., Дмитриев А.В., Батаев Х.М. *Аналитическая и трехмерная (3D) анатомия сосудистого русла почки человека*. Грозный: Изд-во Чеченского гос. ун-та; 2021. 218 с. [Zenin O.K., Kafarov E.S., Kosnikov Yu.N., Baysultanov I.Kh., Dmitriev A.V., Bataev Kh.M. *Analytical and three-dimensional (3D) anatomy of the vascular bed of the human kidney*. Grozny: Chechen State University Publishing House; 2021. 218 p. (in Russ.)].
12. Roux W. Ueber die verzweigungen der blutgefässse. Eine morphologische studie. *Z Naturwiss*. 1878;12:205-266.
13. Murray C.D. The physiological principle of minimum work: I. The vascular system and the cost of blood volume. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1926;12(3):207-214. DOI: 10/d4n7kt
14. Murray C.D. The physiological principle of minimum work applied to the angle of branching of arteries. *Journal of General Physiology*. 1926;9(6):835-841. DOI: 10/dq9qn9
15. Taylor D.J., Saxton H., Halliday I., Newman T., Hose D.R., Kassab G.S., Gunn J.P., Morris P.D. Systematic review and meta-analysis of Murray's law in the coronary arterial circulation. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*. 2024;327(1):H182-H190. DOI: 10.1152/ajpheart.00142.2024
16. Дадашев А.Ш., Милтых И.С., Зенин О.К., Кафаров Э.С. Морфометрические особенности разного типа структурных компонентов внутриорганныго венозного русла селезенки. *Человек и его здоровье*. 2024;27(1):30-38 [Dadashev A.S., Miltykh I.S., Zenin O.K., Kafarov E.S. Morphometric characteristics of different types of splenic venous vasculature's structural components. *Humans and their health*. 2024;27(1):30-38 (in Russ.)]. DOI: 10.21626/vestnik/2024-1/04. EDN: MKLSCV.
17. Кафаров Э.С., Дадашев А.Ш., Милтых И.С., Зенин О.К., авторы; ФГБОУ ВО Пензенский государственный университет, правообладатель. Ко-

- личественная анатомия внутриорганного венозного русла селезенки. Российская Федерация Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023621572. 18 мая 2023 г. [Kafarov E.S., Dadashev A.Sh., Miltykh I.S., Zenin O., inventors; FGBOU VO Penzenskiy gosudarstvennyy universitet, assignee. *Kolichestvennaya anatomiya vnutriorganogo venoznogo rusla selezenki*. Russian Federation Certificate of State Registration of Database No. 2023621572. 2023 May 18. (in Russ.)]. EDN: JTQAFX.
18. Gharahi H., Zambrano B.A., Zhu D.C., DeMarco J.K., Baek S. Computational fluid dynamic simulation of human carotid artery bifurcation based on anatomy and volumetric blood flow rate measured with magnetic resonance imaging. *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*. 2016;8(1):46-60. DOI: 10/f9tbwm.
19. Issa R.I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting. *Journal of Computational Physics*. 1986;62(1):40-65. DOI: 10/fxgbtt.
20. Lechowicz R., Elwertowski M. Standards of the Polish Ultrasound Society. Ultrasound examination of the portal system and hepatic vessels. *Journal of Ultrasonography*. 2015;61:208-226. DOI: 10.15557/JoU.2015.0018
21. Зенін О.К., Нікітін О.В., Чвала О.О., Бешуля О.О., Томаш Д.С., автори. *Спеціальна комп’ютерна система моделювання артеріального кровоносного русла людини («Vasculograph»)*. Україна. Свідотство про реєстрацію авторського права на твір 29585. 27 липня 2009 р. [Zenin O.K., Nikitin O.V., Chvala O.O., Beshulya O.O., Tomash D.S., authors. *Spetsial'na komp'yuterna sistema modelyuvannya arterial'nogo krovonosnogo rusla lyudini («Vasculograph»)*. Ukraine. Certificate of registration of intellectual property rights 29585. 2009 July 27. (in Ukr.)]
22. Xiong Z., Yan Y., Wang X., Liu Z., Luo X., Zheng T. The effect of splenic vein diameter on the diagnosis of portal vein thrombosis. *Medical Physics*. 2023;50(10):6614-6623. DOI: 10.1002/mp.16481
23. Vekilov D.P., Grande-Allen K.J. Mechanical Properties of Diseased Veins. 2018;14(3):182-187. DOI: 10.14797/mdcj-14-3-182
24. Rosen R. *Optimality Principles in Biology*. Springer US; 1967. DOI: 10.1007/978-1-4899-6419-9
25. Crandall C.L., Lin C.J., Wagenseil J.E. *Major vascular ECM components, differential distribution supporting structure, and functions of the vasculome*. In: *The Vasculome*. Elsevier; 2022:77-86. DOI: 10.1016/B978-0-12-822546-2.00010-1
26. Valaris S., Kostourou V. *Cell-Extracellular Matrix Adhesions in Vascular Endothelium*. In: Papadimitriou E, Mikelis CM, eds. *Matrix Pathobiology and Angiogenesis*. Vol 12. *Biology of Extracellular Matrix*. Springer International Publishing; 2023:175-204. DOI: 10.1007/978-3-031-19616-4_7

Поступила в редакцию 21.08.2024
Подписана в печать 25.06.2025

Для цитирования: Дадашев А.Ш., Зенин О.К., Милтых И.С., Батаев Х.М., Вагабов И.У., Кафаров Э.С., Яшина И.Н. Численное моделирование функциональных особенностей разных типов структурных компонентов (бионитов) внутриорганного венозного русла селезенки в норме. *Человек и его здоровье*. 2025;28(2):64-71. DOI: 10.21626/vestnik/2025-2/08. EDN: VHJCUK.

NUMERICAL MODELLING OF FUNCTIONAL PROPERTIES OF DIFFERENT TYPES OF STRUCTURAL COMPONENTS (BIUNITS) OF THE SPLENIC VENOUS VASCULATURE IN NORMAL CONDITIONS

© Dadashev A.Sh.¹, Zenin O.K.², Miltikh I.S.³, Bataev H.M.¹, Vagabov I.U.¹, Kafarov E.S.¹, Yashina I.N.⁴

¹ Kadyrov Chechen State University (CSU)

32, Sheripova Str., Grozny, Chechnya Republic, 364093, Russian Federation

² Penza State University (PSU)

40, Krasnaya Str., Penza, Penza region, 440026, Russian Federation

³ University of Palermo

61, Piazza Marina, 90133, Palermo, Italy

⁴ Kursk State Medical University (KSMU)

3, K. Marx Str., Kursk, Kursk region, 305041, Russian Federation

Objective – to establish functional (conducting, draining, pillar) properties of different types of structural components (biunits) of splenic venous vasculature by their numerical modelling based on the results of morphometry.

Materials and methods. Virtual (digital) models of different types of splenic venous biunits based on their morphometric characteristics obtained earlier were used as objects for the study. We distinguished 4 types of splenic venous biunits: 1 type – complete asymmetry, the diameter of the proximal segment (D) is not equal to the diameters of the larger (dmax) and smaller (dmin) distal segment $D \neq d_{\max} \neq d_{\min}$, 2 type – lateral asymmetry, $D = d_{\max}$, $D \neq d_{\min}$, 3 type – unilateral symmetry, $D \neq d_{\max}$, $d_{\min} = d_{\max}$, 4 type – complete symmetry, $D = d_{\max} = d_{\min}$. ANSYS Student computer program was used to analyse the conductive function (haemodynamic resistance) and pillar function (structural rigidity) of virtual models of different types of splenic venous biunits. The drainage function of virtual models of different types of splenic venous biunits was analysed using the Vasculograph computer program.

Results. It was found that in the direction of increasing the value of the index characterising 1) hemodynamic resistance biunits of different types of splenic venous vasculature were arranged as follows: 1st type, 2nd type, 3rd type, and 4th type; 2) draining function: 4th type, 2nd type, 3rd type and 3) pillar function: 4th type, 3rd type, 2nd type and 1st type.

Conclusion. Different types of splenic venous biunits take part in fulfilment of conducting, draining and pillar functions to an unequal extent. The main role in fulfilment of the functions of blood conduction, drainage of the spleen tissue and creation of the "soft skeleton" of the organ belongs to type 1 splenic venous biunits. The morphometric characteristics of type 1 biunits can be used as a morphometric standard of the splenic venous norm.

Keywords: spleen; morphometry; venous vasculature; structural component – biunit.

Dadashev Ali S. – Postgraduate student of the Department of Normal and Topographical Anatomy with Operative Surgery, Assistant, CSU, Grozny, Russian Federation. ORCID iD: 0000-0001-8502-0841. E-mail: mukulatura95@mail.ru

Zenin Oleg K. – Dr. Sci. (Med.), Professor; Professor at the Department of Human Anatomy, PSU, Penza, Russian Federation. ORCID iD: 0000-0002-5447-1989. E-mail: zen.olegz@gmail.com (corresponding author)

Miltikh Ilia S. – MSc student, University of Palermo, Palermo, Italy. ORCID iD: 0000-0002-9130-3255. E-mail: contact@miltikh.com

Bataev Khizir M. – Dr. Sci. (Med.), Professor; Head of the Department of Faculty Therapy, CSU, Grozny, Russian Federation. ORCID iD: 0000-0003-3213-6474. E-mail: hizir62@mail.ru

Vagabov Islam U. – Cand. Sci. (Med.), Senior Lecturer of the Department of Normal and Topographical Anatomy with Operative Surgery, CSU, Grozny, Russian Federation. ORCID iD: 0000-0002-6033-8148. E-mail: malsi_85@mail.ru

Kafarov Edgar S. – Dr. Sci. (Med.), Associate Professor, Head of the Department of Normal and Topographical Anatomy with Operative Surgery, CSU, Grozny, Russian Federation. ORCID iD: 0000-0002-5447-1989. E-mail: zen.olegz@gmail.com

Yashina Irina N. – Dr. Sci. (Med.), Associate Professor, Professor at Department of Human Anatomy, KSMU, Kursk, Russian Federation. ORCID iD: 0000-0001-6235-2309. E-mail: bik2709@rambler.ru

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

SOURCE OF FINANCING

The authors claim that there are no sources of funding.

COMPLIANCE WITH PRINCIPLES OF ETHICS

This study was approved by the Local Ethical Committee of the Medical Institute of the A.A. Kadyrov Chechen State University (protocol No. 258/24-77 of 16 October 2023).

AUTHORS CONTRIBUTION

Dadashev A.S. – data collection and analysis, drafting of the manuscript. Miltikh Ilia S. – statistical analysis, manuscript drafting, technical and scientific editing of the manuscript. Zenin O.K. – conceptualized and designed the paper, critically revised the manuscript for important intellectual content. Bataev H.M., Kafarov E.S. – development of the concept and design of the study; Vagabov I.U. – data collection and analysis; Yashina I.N. – critically revised the manuscript for important intellectual content.

Received 21.08.2024

Accepted 25.06.2025

For citation: Dadashev A.Sh., Zenin O.K., Miltikh I.S., Bataev H.M., Vagabov I.U., Kafarov E.S., Yashina I.N. Numerical modeling of functional properties of different types of structural components (biunits) of the splenic venous vasculature in normal conditions. *Humans and their health*. 2025;28(2):64–71. DOI: 10.21626/vestnik/2025-2/08. EDN: VHJCUK.