

РАСЧЕТ УДАРНОГО ОБЪЕМА ЛЕВОГО ЖЕЛУДОЧКА ПО ФОРМУЛЕ РЕЛО: КОРРЕКТНЫЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОРНЯ АОРТЫ В ОЦЕНКЕ СИСТЕМНОГО ПОТОКА КРОВИ

А. Б. Наумов^{3*}, В. В. Макарук², С. П. Марченко¹, О. Ю. Чупаева¹, А. М. Волков³, Г. Г. Хубулава¹

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

² Государственное учреждение Луганской Народной Республики «Луганский государственный медицинский университет имени Святителя Луки», г. Луганск, Луганская Народная Республика, Россия

³ Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова» Министерства обороны Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 10.12.2020 г.; принята к печати 28.09.2022 г.

ЦЕЛЬ. Оценка ударного объема левого желудочка, рассчитанного с помощью формулы Рело (Reuleaux) и сравнение с показателями, полученными при измерениях в выводном тракте левого желудочка.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ. Авторами проведено проспективное поперечное исследование размеров сечения выводного тракта левого желудочка (ВТЛЖ), аортального клапана (АК), интегральной скорости потока (velocity-time integral, VTI) с последующим расчетом значения ударного объема левого желудочка в ВТЛЖ и аортальном клапане у 36 пациентов, получающих заместительную почечную терапию.

РЕЗУЛЬТАТЫ. У 36 пациентов были определены размеры анатомических структур (среднее значение площади ВТЛЖ – 3,8 см², среднее значение площади отверстия АК – 2,8 см², площадь АК по формуле круга – 3,14 см², площадь АК по формуле Рело – 2,8 см²). Среднее значение интегральной скорости потока в ВТЛЖ – 21 см, интегральной скорости на АК – 26,9 см. Ударный объем (УО) в ВТЛЖ – 70,85 мл, УО на АК по площади отверстия АК – 70,9 мл, УО на АК по формуле круга – 76,5 мл, УО на АК по формуле Рело – 68,72 мл. При сравнительном анализе результатов математических расчетов выявлено, что в сравнении с УО в ВТЛЖ расхождение результатов более чем на 30 % оказалось при использовании формулы круга ($\chi^2=4,1$, $p=0,04$), в сравнении с формулой Рело (13,8 % против 4,1 % соответственно).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Показатели ударного объема левого желудочка, рассчитанные с использованием формулы Рело, совпадают с выбранными в исследовании эталонными значениями, вычисленными для выводного отдела левого желудочка.

Ключевые слова: ударный объем, формула Рело, выходной тракт левого желудочка, аортальный клапан

Для цитирования: Наумов А. Б., Макарук В. В., Марченко С. П., Чупаева О. Ю., Волков А. М., Хубулава Г. Г. Расчет ударного объема левого желудочка по формуле Рело: корректные геометрические характеристики корня аорты в оценке системного потока крови. *Вестник хирургии имени И. И. Грекова*. 2022;181(3):12–19. DOI: 10.24884/0042-4625-2022-181-3-12-19.

* **Автор для связи:** Алексей Борисович Наумов, Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова, 194044, Россия, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6. E-mail: Naumov99@gmail.com.

LEFT VENTRICULAR STROKE VOLUME CALCULATION BASED ON REULEAUX TRIANGLE FORMULA: CORRECT GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF AORTIC ROOT IN SYSTEMIC BLOOD FLOW ASSESSMENT

Alexey B. Naumov^{3*}, Vladimir V. Makaruk², Syrgel P. Machinko¹, Olga Yu. Chupaeva¹, Andrey M. Volkov³, Gennadiy G. Khubulava¹

¹ Pavlov University, Saint Petersburg, Russia

² Lugansk State Medical University, Lugansk, Russia

³ Military Medical Academy, Saint Petersburg, Russia

Received 10.12.2020; accepted 28.09.2022

The OBJECTIVE was to estimate the left ventricular stroke volume calculated using the Reuleaux triangle formula, and compare with the parameters obtained from measurements in the left ventricle outflow tract.

METHODS AND MATERIALS. A prospective cross-sectional study of the dimensions of the left ventricular outflow tract (LVOT), the aortic valve, and the velocity-time integral (VTI) was carried out, followed by calculation of the left ventricular stroke volume in the LVOT and aortic valve in 36 patients receiving renal replacement therapy.

RESULTS. The sizes of anatomical structures were determined in 36 patients. The average value of the LVOT area was calculated – 3.8 cm², the average value of the area of the aortic valve (AV) opening was 2.8 cm², the AV area according to the circle formula – 3.14 cm², the AV area according to the Reuleaux triangle formula – 2.8 cm². The mean value of the VTI in the LVOT was 21 cm; the VTI on the AV was 26.9 cm. The stroke volume (SV) in the LVOT was 70.85 ml, the SV on the AV by the area of the AV opening was 70.9 ml, the SV on the AV according to the circle formula – 76.5 ml, SV for AV according to the Reuleaux triangle formula – 68.72 ml. In a comparative analysis of the results of mathematical calculations, it was revealed that, in comparison with the SV in LVOT, the discrepancy between the results was more than 30 % when using the circle formula ($\chi^2=4.1$, $p=0.04$), in comparison with the Reuleaux triangle formula (13.8 % versus 4.1 %, respectively).

CONCLUSION. Parameters of the left ventricular stroke volume calculated with the Reuleaux triangle formula matches to the reference values selected in the study, calculated for the left ventricular outflow tract.

Keywords: stroke volume, Reuleaux triangle formula, left ventricular outflow tract, aortic valve

For citation: Naumov A. B., Makaruk V. V., Machinko S. P., Chupaeva O. Yu., Volkov A. M., Khubulava G. G. Left ventricular stroke volume calculation based on Reuleaux triangle formula: correct geometric characteristics of aortic root in systemic blood flow assessment. *Grekov's Bulletin of Surgery*. 2022;181(3):12–19. (In Russ.). DOI: 10.24884/0042-4625-2022-181-3-12-19.

* **Corresponding author:** Alexey B. Naumov, Military Medical Academy, 6, Akademika Lebedeva str., Saint Petersburg, 194044, Russia. E-mail: Naumov99@gmail.com.

Введение. Своевременное выявление гемодинамических признаков нарушения системной перфузии вследствие снижения скорости системного потока необходимо для оптимизации лечебной тактики ведения пациентов с патологией сердца [1–3]. Для диагностики острой сердечной недостаточности (ОСН) из параметрических и номинальных показателей ключевым является системный поток крови [4–6]. Среди инвазивных и неинвазивных методик определения сердечного выброса в клинической практике преимуществом для определения системного потока крови обладают эхокардиографические методики [7, 8]. Одним из самых распространенных является метод определения ударного объема в выносящем тракте левого желудочка [9]. Значение ударного объема крови рассчитывается умножением интегральной скорости потока, определенной с помощью импульсного доплера на площадь поперечного сечения исследуемой структуры сердца [3, 10, 11]. У постели больного не всегда удается корректно визуализировать необходимые структуры, а значения ударного объема, рассчитанные по раскрытию створок АК, могут быть завышенными относительно ударного объема, определенного в ВТЛЖ [11, 12]. Причиной является форма открытия створок аортального клапана, описываемая известной математической моделью треугольника Рело [13]. Для расчета поперечной площади сечения в эхокардиографии существует формула круга и формула треугольника Рело:

$$S_{\text{круга}} = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 = 0,785 \cdot d^2,$$

$$S_{\text{треугольника Рело}} = \frac{1}{2} \cdot (\pi - \sqrt{3}) \cdot d^2 = 0,705 \cdot d^2.$$

Нами было выдвинуто предположение, что для определения ударного объема крови через аортальный клапан с помощью постоянного доплера це-

лесообразно применять формулу расчета площади поперечного сечения для треугольника Рело. Поэтому для расчета ударного объема ЛЖ в исследовании применена формула треугольника Рело, стороны которого представлены участками трех взаимопересекающихся окружностей, радиусы которых равны его сторонам и вершины являются центрами этих окружностей (рис. 1).

Цель исследования – оценка ударного объема левого желудочка, рассчитанного с помощью формулы Рело (Reuleaux) и сравнение с показателями, полученными при измерениях в выводном тракте левого желудочка.

Методы и материалы. Проведенное исследование основано на результатах обследования 36 пациентов в возрасте от 18 до 72 лет, госпитализированных в отделение нефрологии и гемодиализа Луганской республиканской клинической больницы в 2019 г. Основными критериями включения в исследование были самостоятельное дыхание и хорошая визуализация изучаемых структур. Большинство пациентов, включенных в данное исследование, не имели показаний для проведения эхокардиографии. Данное исследование было выполнено с согласия пациентов в качестве дополнительного. Основные патологии исследуемых пациентов – хроническая болезнь почек (ХБП) II–V стадии – 20 (55,55 %) больных, острая почечная недостаточность (ОПН) – 10 (27,78 %) больных, острое отравление – 6 (16,67 %) пациентов. Антропометрические данные и возраст обследованных отображены в табл. 1.

Эхокардиографическое исследование проводилось с помощью аппарата GE Logic-I. Определялись размеры следующих анатомических структур: диаметр ВТЛЖ, расстояние раскрытия створок АК. Измерение интегральной скорости потока (VTI) в ВТЛЖ и АК выполнялось из 5-камерной позиции. В ВТЛЖ поток оценивали с помощью импульсного доплера. Поток на АК оценивали в режиме непрерывно-волнового доплера. Планиметрические измерения ВТЛЖ и расхождения створок АК выполняли из парастернальной позиции по длинной оси.

Площадь поперечного сечения в ВТЛЖ оценивали по общепринятой формуле:

$$S_{\text{ВТЛЖ}} = D^2 \cdot 0,785.$$

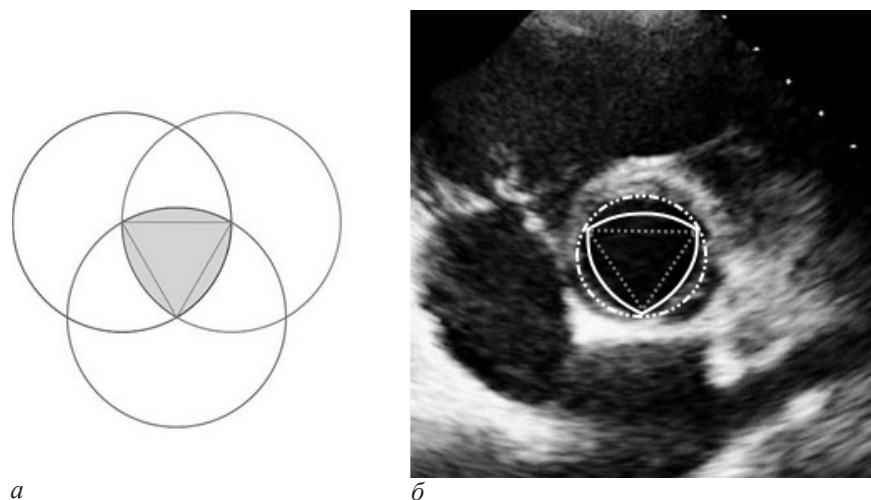


Рис. 1. Треугольник Рело и его проекция на УЗИ-изображение открытого аортального клапана: а – схематичное изображение треугольника Рело в проекции трех взаимопересекающихся окружностей; б – проекция треугольника Рело на УЗИ-изображение открытого аортального клапана: парастернальная позиция, короткая ось; белым цветом выделены контуры треугольника Рело, серыми пунктирными линиями выделены проекции радиусов створок аортального клапана, белой штриховой линией с двумя пунктирами выделен контур окружности кольца аортального клапана

Fig. 1. The Reuleaux triangle and its projection on ultrasound image of the open aortic valve: а – the schematic image of the Reuleaux triangle in the projection of three intersecting circles; б – the projection of the Reuleaux triangle on ultrasound image of the open aortic valve: parasternal position, short axis; contours of the Reuleaux triangle are highlighted in white, projections of the radii of aortic valve flaps are highlighted in gray dotted lines, the contour of the circumference of the aortic valve ring is highlighted in white dash-dot-dot line

Таблица 1

Антропометрические показатели пациентов

Table 1

Anthropometric parameters of patients

Показатель	Me (Q1:Q3; мин–макс)
Возраст, лет	40 (30,66:55,33; 18–72)
Вес, кг	78,5 (165:176,75; 148–185)
Рост, см	170,5 (62,75:90,75; 50–120)
ИМТ, кг/м ²	26,3 (23,38:31,35; 17,7–43)
ППТ, м ²	1,96 (1,72:2,06; 1,42–2,35)

Площадь отверстия, образующегося при открытии створок аортального клапана, оценивали по формуле расчета площади сечения треугольника Рело:

$$S_{AK(Рело)} = 0,5 \cdot (\pi - \sqrt{3}) \cdot D^2 = 0,705 \cdot D^2.$$

Для сравнительной оценки значений открытия створок аортального клапана использовали формулу круга ($S_{AK}=D^2 \cdot 0,785$) и формулу непрерывности потока ($S_{AVA}=VTI_{ВТЛЖ} \cdot S_{ВТЛЖ}/VTI_{AK}$).

Расчет ударного объема осуществляли по формуле: $VO = S \cdot VTI$. $S_{ВТЛЖ}$ – площадь сечения ВТЛЖ, S площадь сечения анатомического образования (см²), D – диаметр (см), VTI – интегральная скорость потока (см).

Статистический анализ данных производился при помощи программного обеспечения Microsoft Excel 2016 и IBM SPSS Statistics 26. Учитывая небольшой объем выборки и отсутствие в большинстве случаев нормального распределения данных, статистическая обработка данных выполнялась непараметрическими методами. Результаты представлены в виде медианы (Me), первого и третьего квартиля (Q1, Q3), минимальных и максимальных значений. Корреляционный анализ прово-

дили с указанием коэффициента R и уровня значимости p . Данные линейного регрессионного анализа представлены в графическом виде и в виде уравнений с указанием основной константы, коэффициента «х» и рассчитанных для них уровня значимости «р». Оценку различий числовых значений выполняли по методу Вилкоксона с указанием коэффициента Z (Z Vile) и уровня значимости «р». Статистически значимым «р» считали $p < 0,05$ [14].

Результаты. Основные анатомические размеры внутрисердечных структур, необходимых для получения искомых расчетных параметров, представлены в табл. 2. Диаметр ВТЛЖ у исследуемых пациентов находился в пределах нормальных значений и в сравнении с нормализованными показателями к антропометрическим данным отклонения от нормы более чем $\pm 2Z$ не наблюдалось.

Раскрытие створок АК во всех наблюдениях было меньше, чем анатомический размер диаметра ВТЛЖ. Расчетные значения площади сечения

Таблица 2

Результаты выполненных измерений и расчетов

Table 2

The results of the performed measurements and calculations

	Медиана	Q1	Q3	Минимум	Максимум
Диаметр ВТЛЖ, см	2,19	2,00	2,20	1,70	2,33
Расхождение створок АК, см	2,00	1,70	2,00	1,50	2,15
Площадь ВТЛЖ, см ²	3,76	3,14	3,80	2,27	4,26
Площадь AVA, см ²	2,81	2,29	3,25	1,13	3,87
Площадь АК по формуле Рело, см ²	2,82	2,04	2,82	1,59	3,26
Площадь АК по формуле круга, см ²	3,14	2,27	3,14	1,77	3,63
Интегральная скорость потока ВТЛЖ, см	21,00	18,50	23,00	14,30	27,00
Интегральная скорость на АК, см	26,90	23,95	29,30	17,00	36,10
УО в ВТЛЖ, мл	70,85	63,55	83,07	38,57	96,12
УО на АК по AVA, мл	70,85	63,55	83,07	38,57	96,12
УО на АК по формуле Рело, мл	68,72	55,12	77,31	39,89	97,29
УО на АК по формуле круга, мл	76,52	61,37	86,08	44,41	108,33

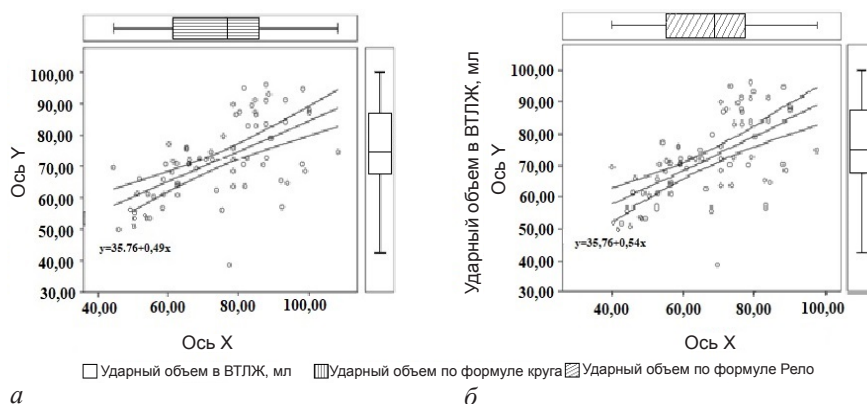
ВТЛЖ, как абсолютные, так и нормализованные по антропометрическим данным, не имели отклонений от нормы. При попарном сравнении по критерию Вилкоксона было выявлено, что все значения площади сечения аортального клапана, полученные в результате расчетов по примененным в исследовании методикам, существенно отличались от значения площади сечения выносящего тракта левого желудочка при Z менее $-7,0$ и p менее $0,01$. В исследовании выявлено, что полученные значения площади сечения аортального клапана, рассчитанные по разным методикам, также имели значимые отличия между собой при попарном сравнении по непараметрическому критерию Вилкоксона при значениях Z менее $3,0$ и уровню статистической значимости различий менее $0,01$. При оценке расчетных значений площади открытия АК обращает внимание полное совпадение значений медиан между площадью АК и площадью по формуле Рело, в то время как полученные значения площади по формуле круга имеют тенденцию к завышению этого параметра в сравнении с площадью АК. Все расчетные значения площади открытия АК при статистическом непараметрическом анализе имели существенные отличия между собой (Z менее $1,8$ и p менее $0,04$).

Значения интегральной скорости потока в ВТЛЖ во всех наблюдениях были меньше, чем на АК. Медиана разницы по значению VTI между ВТЛЖ и АК составила 5 см ($Q1:Q2=2,8-6,85$), при этом минимальное значение было зафиксировано равное $1,0$ см, а максимальное достигало 17 см. Значение медианы процентного соотношения интегральной скорости потока между двумя этими структурами составило 18 % ($Q1:Q2=11,2-26,15$) при минимально зафиксированном в $3,8$ %, а максимальное значение этого показателя оказалось $50,1$ %. Более

того, в 12 ($16,6$ %) случаях наблюдались проявления умеренного стенозирования потока на уровне аортального клапана в виде увеличения разницы интегральной скорости потока между ВТЛЖ и аортальным клапаном на величину более 30 %. Однако пациентов в исследовании с патологией аортального клапана не было, средний градиент потока через аортальный клапан не превышал 20 мм рт. ст.

С помощью данных интегральной скорости потока и площади сечения анатомической структуры были получены значения ударного объема. Значение ударного объема, определенного в ВТЛЖ в нашем исследовании, было принято как эталонное. Были получены значения ударного объема крови, протекающего через аортальный клапан, рассчитанные по трем формулам. Значения УО при оценке площади сечения по уравнению непрерывности потока были полностью идентичны значениям УО, полученным в результате расчетов потока крови в ВТЛЖ. Это объясняется прямыми связями между площадью сечения ВТЛЖ и АК в уравнении потока. Напротив, значения УО, рассчитанные с применением значения расхождения створок АК при использовании формулы круга и формулы Рело для вычисления площади сечения открытия АК, в обоих случаях существенно (Z менее $2,5$ и p менее $0,01$) отличались от результатов, полученных при анализе параметров ВТЛЖ.

Корреляционно-регрессионный анализ показал, что значения УО, полученные с применением в расчетах площади открытия АК формулы круга и формулы Рело, имели одинаковую прямую сильную значимую корреляционную связь с УО, рассчитанным для ВТЛЖ. Полученные регрессионные уравнения между собой были существенно сходны и во всех описывающих уравнениях параметры имели высокий уровень значимости



а

б

Рис. 2. Регрессионный анализ при сравнении УО в ВТЛЖ и УО через АК, рассчитанного с применением формулы круга и формулы Рело: а – график корреляции ударного объема ВТЛЖ и АК, рассчитанного по формуле круга, в центре – линия аппроксимации, в правом нижнем углу – корреляционное уравнение, по оси X – значения ударных объемов аортального клапана, рассчитанных по формуле круга клапане у исследуемых пациентов; б – график корреляции ударного объема ВТЛЖ и АК, рассчитанного по формуле Рело, по оси X – значения ударных объемов АК, рассчитанного по формуле Рело; по оси Y на обоих графиках значения ударного в ВТЛЖ у исследуемых пациентов

Fig. 2. Regression analysis when comparing SV in the LVOT and SV through AV calculated according to the circle formula and the Reuleaux triangle formula: а – the correlation graph of the stroke volume of the LVOT and AV calculated according to the circle formula, in the center – the approximation line, in the lower right corner – the correlation equation, along the X-axis – the values of stroke volumes of the aortic valve calculated according to the formula of the valve circle in the studied patients; б – the correlation graph of the stroke volume of the LVOT and AV calculated using the Reuleaux triangle formula, on the X-axis – the values of stroke volumes of the AV calculated using the Reuleaux triangle formula; on the Y-axis on both graphs – the values of the stroke in the LVOT in the studied patients

различия частотей. Так, взаимосвязь УО в ВТЛЖ с УО на АК, рассчитанных по формуле круга, описывается следующими параметрами: $R=0,599$, $R^2=0,359$, $F=39,1$, $p=0,001$. Основная константа 35,7 ($m=5,9$) $p=0,001$. Коэффициент $x=0,488$ ($m=0,07$) $p=0,001$. УО на АК по формуле Рело был связан со значениями УО в ВТЛЖ с $R=0,599$, $R^2=0,359$, $F=39,1$, $p=0,001$. Основная константа 35,7 ($m=5,9$) $p=0,001$. Коэффициент $x=0,543$ ($m=0,08$) $p=0,001$. Таким образом, разница между двумя регрессионными уравнениями заключается только в значениях коэффициента «х» (рис. 2).

В ходе сравнительного анализа было выявлено, что значения ударного объема, полученные по формуле круга и формуле Рело, отличались друг от друга ($Z=3,2$, $p=0,001$). Однако было выявлено, что при сравнении с УО в ВТЛЖ частота встречаемости расхождения результатов более чем на 30 % была значительно больше ($\chi^2=4,1$, $p=0,04$) при использовании формулы круга, чем при расчетах с помощью формулы Рело (13,8 % против 4,1 % соответственно). В то же время по частоте встречаемости значимых расхождений результатов более чем на 10 % и 20 % между двумя методиками расчета ударного объема найдено не было (рис. 3).

Обсуждение. В ходе исследования было выявлено, что все анатомические структуры имели нормальные размеры. Однако при анализе размеров и формы отверстия АК было выявлено существенное влияние его геометрии на гемодинамические

характеристики потока, прежде всего на параметр интегральной скорости потока и, таким образом, на значение УО. При применении формулы круга и формулы Рело для расчета площади сечения АК были получены различные значения площади этого анатомического отверстия. Статистический анализ показал, что применение формулы Рело дает более близкие значения площади отверстия к значениям, определенным по формуле непрерывности потока. Кроме того, значения ударного объема, полученные с помощью формулы площади треугольника Рело, по точности результата приближаются к эталонному значению, а именно УО, рассчитанному для ВТЛЖ. При эхокардиографическом сканировании АК по короткой оси в момент максимального открытия створок форма отверстия соответствует треугольнику Рело. Учитывая геометрическую особенность треугольника Рело, получение первичных данных для расчета его площади не представляет затруднений, так как размер диаметра, проведенный из разных точек его периметра, является постоянной величиной [13].

Коаптация и раскрытие створок АК зависят от соотношения пространственных и геометрических характеристик структур корня аорты [14]. Размеры структур имеют различия не только между индивидами, но и между структурами одного корня аорты. Визуализация с помощью эхокардиографии геометрических характеристик корня аорты, обеспечивающих функцию АК, необходима не только

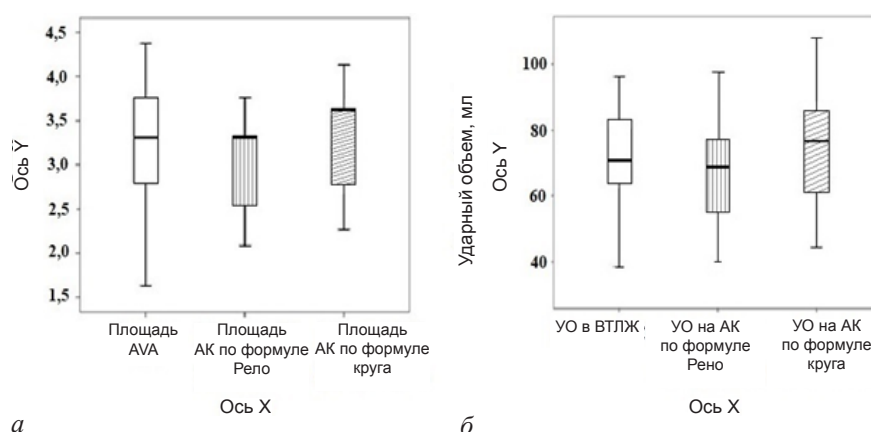


Рис. 3. Сравнение значений площади поперечного сечения и ударного объема АК: а – площадь аортального клапана рассчитанная с применением уравнения непрерывности потока (белая диаграмма, AVA), площадь АК по формуле Рело (диаграмма с серой прямой штриховкой), площадь АК, рассчитанная по формуле круга (диаграмма с серой косой штриховкой); б – ударный объем в ВТЛЖ (белая диаграмма), ударный объем на аортальном клапане рассчитанный по формуле Рело (диаграмма с серой прямой штриховкой) и формуле круга (диаграмма с серой косой штриховкой)

Fig. 3. Comparison of the values of the cross-sectional area and the stroke volume of the AV: а – the area of the aortic valve calculated using the flow continuity equation (white diagram, AVA), the area of the AV using the Reuleaux triangle formula (diagram with gray straight hatching), the area of the AV calculated according to the circle formula (diagram with gray oblique hatching); б – stroke volume in the LVOT (white diagram), stroke volume on the aortic valve calculated using the Reuleaux triangle formula (diagram with gray straight hatching) and the circle formula (diagram with gray oblique hatching)

для точной оценки УО левого желудочка у новорожденных, детей и взрослых, но и для оценки гемодинамического эффекта реконструктивных операций, функционирования имплантатов в корне аорты [15–19].

Основным недостатком работы является отсутствие сравнения эхокардиографического метода с инвазивными методами исследования (PICCO2 мониторинг, транспульмональная термодилуция с помощью катетера Сван-Ганца) и магнитно-резонансной томографией. Выборка представлена пациентами одной нозологической категории, что не позволяет экстраполировать данные на другие подгруппы пациентов. Тем не менее, результаты подтверждают целесообразность применения формулы Рело в гемодинамических исследованиях.

Выводы. Показатели ударного объема левого желудочка, рассчитанные с использованием формулы Рело, совпадают с выбранными в исследовании эталонными значениями, вычисленными для выводного отдела левого желудочка.

Конфликт интересов

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Соответствие нормам этики

Авторы подтверждают, что соблюдены права людей, принимавших участие в исследовании, включая получение информированного согласия в тех случаях, когда оно необходимо, и правила обращения с животными в случаях их использования в работе. Подробная информация содержится в Правилах для авторов.

Compliance with ethical principles

The authors confirm that they respect the rights of the people participated in the study, including obtaining informed consent when it is necessary, and the rules of treatment of animals when they are used in the study. Author Guidelines contains the detailed information.

ЛИТЕРАТУРА

1. Селиверстова А. А., Савенкова Н. Д., Хубулава Г. Г., Марченко С. П., Наумов А. Б. Острое повреждение почек у новорожденных и детей грудного возраста с врожденными пороками сердца после кардиохирургических вмешательств // Нефрология. 2017. Т. 21, № 3. С. 54–60. Doi:10.24884/1561-6274-2017-3-54-60.
2. Хубулава Г. Г., Наумов А. Б., Марченко С. П., Чупаева О. Ю., Селиверстова А. А., Пилюгов Н. Г., Терешенко О. Ю., Александрович Ю. С., Пшениснов К. В., Попова Л. Л., Андреев М. С., Невмержицкая О. В. Газовый состав крови у новорожденных с параллельным кровообращением при нарушениях системной перфузии после коррекции врожденных пороков сердца // Детские болезни сердца и сосудов. 2019. Т. 16, № 1. С. 43–55. Doi: 10.24022/1810-0686-2019-16-1-43-55.
3. Blanco P. Rationale for using the velocity-time integral and the minute distance for assessing the stroke volume and cardiac output in point-of-care settings // The Ultrasound Journal. 2020. Vol. 12, № 1. P. 21. Doi: 10.1186/s13089-020-00170-x.
4. Ломиворотов В. В., Ломиворотов В. Н. Периоперационное повреждение и инфаркт миокарда // Вестн. анестезиологии и реаниматологии. 2019. Т. 16, № 2. С. 51–56. Doi:10.21292/2078-5658-2019-16-2-51-56.
5. Наумов А. Б., Полушин Ю. С., Хубулава Г. Г., Александрович Ю. С., Марченко С. П., Пшениснов К. В., Пилюгов Н. Г. Оценка нарушений системной перфузии у пациентов с единым желудочком сердца на основании параметров газового состава крови // Вестн. анестезиологии и реаниматологии. 2020. Т. 17, № 3. С. 6–16. Doi: 21292/2078-5658-2020-17-3-6-16.
6. Хубулава Г. Г., Марченко С. П., Наумов А. Б., Невмержицкая О. В., Чупаева О. Ю., Селиверстова А. А., Александрович Ю. С., Пшениснов К. В., Пилюгов Н. Г., Терешенко О. Ю., Попова Л. Л., Андреев М. С. Особенности гемодинамического статуса у здоровых новорожденных в раннем неонатальном периоде // Российский

- вестн. перинатологии и педиатрии. 2019. Т. 64, № 1. С. 30–38. Doi: 10.21508/1027-4065-2019-64-1-30-38.
7. Wandt B., Bojo L., Tolagen K., Wranne B. Echocardiographic assessment of ejection fraction in left ventricular hypertrophy // *Heart*. 1999. Vol. 82, № 2. P.192–198.
8. Folland E.D., Parisi A.F., Moynihan P. F., Jones D.R., Feldman C. L., Tow D. E. Assessment of Left Ventricular Ejection Fraction and Volumes by Real-time, Two-dimensional Echocardiography. A Comparison Cineangiography and Radionuclide Techniques // *Circulation*. 1979. Vol. 60, № 4. P.760–766.
9. Tan C., Rubenson D., Srivata A., Mohan R., Smith M.R., Billick K., Bardarian S., J Heywood T. Left ventricular outflow tract velocity-time integral outperforms ejection fraction and Doppler-derived cardiac output for predicting outcomes in a select advanced heart failure cohort // *Cardiovascular Ultrasound*. 2017. Vol. 15, №1. P. 18.
10. Aligholizadeh E. Aligholizadeh E., Teeter W., Patel R., Hu P., Fatima S., Yang S., Ramani G., Safadi S., Olivieri P., Scalea T., Murthi S. A novel method of calculating stroke volume using point-of-care echocardiography // *Cardiovascular Ultrasound*. 2020. Vol. 18, №1. P. 37.
11. Баутин А. Е., Осовских В. В. Острая правожелудочковая недостаточность // *Вестн. анестезиологии и реаниматологии*. 2018. Т. 15, № 5. С. 74–86. Doi: 10.21292/2078-5658-2018-15-5-74-86.
12. Tanimoto T., Ishibashi K., Yamano T. et al. The measurement of stroke volume by cine magnetic resonance imaging and phase contrast velocity mapping // *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*. 2013. Vol. 15, №1. E 105.
13. Finch S. R. Reuleaux Triangle Constants // *Mathematical Constants*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. P. 513–515.
14. Унгуряну Т. Н., Гржибовский А. М. Краткие рекомендации по описанию, статистическому анализу и представлению данных в научных публикациях // *Экология человека*. 2011. № 5. С. 55–60.
15. Хубулава Г. Г., Марченко С. П., Старчик Д. А., Суворов В. В., Кривошеков Е. В., Шихвердиев Н. Н., Наумов А. Б. Геометрические и морфологические характеристики корня аорты в норме и при недостаточности аортального клапана // *Хирургия. Журн. им. Н. И. Пирогова*. 2018. № 5. С. 4–12. Doi: 10.17116/hirurgia201854-12.
16. Белевитин А. Б., Хубулава Г. Г., Сазонов А. Б., Шихвердиев Н. Н., Пелешок А. С., Марченко С. П., Юрченко Д. Л. Хирургическое лечение заболеваний грудной аорты // *Мед. академ. журн*. 2010. Т. 10, №3. С. 45–51. Doi: 10.17816/MAJ10345-51.
17. Марченко С. П., Хубулава Г. Г., Наумов А.Б., Селиверстова А. А., Ципурдеева Н. Д., Суворов В. В., Невмержикская О. В., Александрович Ю. С., Кулемин Е. С. Патофизиологические принципы и подходы к оценке гемодинамики // *Педиатр*. 2014. Т. 5, № 4. С. 110–117.
18. Марцинкевич Г. И., Кривошеков Е. В., Соколов А. А. Послеоперационное ремоделирование сердца у детей при коррекции межжелудочковых дефектов // *Сибир. журн. клинической и экспериментальной медицины*. 2012. Т. 27, № 1. С. 44–48.
19. Марцинкевич Г. И., Соколов А. А., Кривошеков Е. В. Эхокардиография у детей, антропометрические и возрастные нормы, сравнительные возможности трехмерной эхокардиографии // *Сибир. журн. клинической и экспериментальной медицины*. 2010. Т. 25, № 4–1. С. 67–71.
20. Blanco P. Rationale for using the velocity-time integral and the minute distance for assessing the stroke volume and cardiac output in point-of-care settings // *The Ultrasound Journal*. 2020;12(21).
21. Lomivorotov V. V., Lomivorotov V. N. Peri-operative injury and myocardial infarction // *Messenger of anesthesiology and resuscitation*. 2019; 16(2):51–56. (In Russ.). Doi: 10.21292/2078-5658-2019-16-2-51-56.
22. Naumov A. B., Polushin Yu. S., Khubulava G. G., Aleksandrovich Yu. S., Marchenko S. P., Pshenishnov K. V., Pilyugov N. G. Systemic perfusion assessment in patients with univentricular hemodynamics based on blood gas parameters // *Messenger of anesthesiology and resuscitation*. 2020;17(3):6–16. (In Russ.). Doi: 10.21292/2078-5658-2020-17-3-6-16.
23. Khubulava G. G., Marchenko S. P., Naumov A. V., Nevmerzhitckaya O. V., Chupaeva O. Yu., Seliverstova A. A., Aleksandrovich Yu.S., Pshenishnov K. V., Pilyugov N. G., Tereshenko O. Yu., Popova L. L., Andreev M. S. Peculiarities of hemodynamic status of healthy newborns in early neonatal period. *Rossiyskiy Vestnik Perinatologii i Pediatrii* (Russian Bulletin of Perinatology and Pediatrics). 2019;64(1):30–38. (In Russ.). Doi: 10.21508/1027-4065-2019-64-1-30-38.
24. Wandt B., Bojo L., Tolagen K., Wranne B. Echocardiographic assessment of ejection fraction in left ventricular hypertrophy // *Heart*. 1999; 82(2):192–198.
25. Folland A. F. Parisi, P. F. Moynihan et al. Assessment of Left Ventricular Ejection Fraction and Volumes by Real-time, Two-dimensional Echocardiography. A Comparison Cineangiography and Radionuclide Techniques // *Circulation*. 1979;60(4):760–766.
26. Tan C., Rubenson D., Srivata A. et al. Left ventricular outflow tract velocity-time integral outperforms ejection fraction and Doppler-derived cardiac output for predicting outcomes in a select advanced heart failure cohort // *Cardiovascular Ultrasound*. 2017;15(1):18.
27. Aligholizadeh E. Aligholizadeh E., Teeter W., Patel R., Hu P., Fatima S., Yang S., Ramani G., Safadi S., Olivieri P., Scalea T., Murthi S. A novel method of calculating stroke volume using point-of-care echocardiography // *Cardiovascular Ultrasound*. 2020;18(1):37.
28. Bautin A. E., Osovskikh V. V. Acute right ventricular failure. *Messenger of anesthesiology and resuscitation*. 2018;15(5):74–86. (In Russ.). Doi: 10.21292/2078-5658-2018-15-5-74-86.
29. Tanimoto T., Ishibashi K., Yamano T. et al. The measurement of stroke volume by cine magnetic resonance imaging and phase contrast velocity mapping // *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*. 2013;15(1):E:105.
30. Finch S. R. Reuleaux Triangle Constants // *Mathematical Constants*. Cambridge, Cambridge University Press, 2003:513–515.
31. Unguryanu T. N., Grzhibovskii A. M. Brief recommendations on the description, statistical analysis and presentation of data in scientific publications. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology]. 2011; 5: 55–60. (In Russ.).
32. Khubulava G.G., Marchenko S.P., Starchik D.A., Suvorov V. V., Krivoschekov E. V., Shikhverdiev N. N., Naumov A. B. Geometric and morphological features of the aortic root in norm and aortic regurgitation // *Pirogov Russian Journal of Surgery*. 2018;(5):4–12. (In Russ.). Doi: 10.17116/hirurgia201854-12.
33. Belevitin A. B., Khubulava G. G., Sazonov A. B., Shikhverdiyev N. N., Peleshok A. S., Marchenko C. P., Yurchenko D. L. Surgical treatment of thoracic aorta diseases // *Medical academic journal*. 2010;10(3):45–51. (In Russ.). Doi: 10.17816/MAJ10345-51.
34. Marchenko S. P., Khubulava G. G., Naumov A. B., Seliverstova A. A., Cipurdeeva N. D., Suvorov V. V., Nevmerzickaya O. V., Alexandrovich U. S., Kulemin E. S. Pathophysiological principles for evaluating hemodynamic // *Pediatrician* 2014;5(4):110–117. (In Russ.).
35. Martsinkevich G.I., Krivoschekov E.V., Sokolov A.A. Early postoperative heart remodeling in children with ventricular septal defects. *The Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine*. 2012;27(1):44–48. (In Russ.).
36. Martsinkevich G. I., Sokolov A. A. Echocardiography in children, anthropometrical and age norms, comparative possibilities of three-dimensional echocardiography. *The Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine*. 2010;25(4–1):67–71. (In Russ.).

REFERENCES

Информация об авторах:

Хубулава Геннадий Григорьевич, доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, зав. кафедрой факультетской с курсом лапароскопической хирургии и сердечно-сосудистой хирургии с клиникой, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0000-0001-8873-7071; **Наумов Алексей Борисович**, врач анестезиолог – реаниматолог первой кафедры хирургии усовершенствования врачей им. П. А. Куприянова, Военно-медицинская академия им. С. М. Кирова (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0000-0003-0323-0162; **Макарук Владимир Владимирович**, ассистент кафедры анестезиологии, интенсивной терапии и экстренной медицинской помощи, Луганский государственный медицинский университет им. Святителя Луки (г. Луганск, Луганская Народная Республика, Россия), ORCID: 0000-0001-9884-7135; **Марченко Сергей Павлович**, доктор медицинских наук, профессор кафедры факультетской хирургии с курсом лапароскопической и сердечно-сосудистой хирургии с клиникой, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0000-0003-4785-4532; **Чупаева Ольга Юрьевна**, врач-неонатолог отделения новорожденных клиники акушерства и гинекологии, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0000-0003-4204-6915; **Волков Андрей Михайлович**, доцент первой кафедры хирургии усовершенствования врачей им. П. А. Куприянова, Военно-медицинская академия им. С. М. Кирова (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0000-0001-7361-3498.

Information about authors:

Khbulava Gennadiy G., Dr. of Sci. (Med.), Academician of RAS, Head of the Department of Faculty Surgery with Courses of Laparoscopic and Cardiovascular Surgery with Clinic, Pavlov University (Saint-Petersburg, Russia), ORCID: 0000-0002-9242-9941; **Naumov Alexey B.**, Intensivist of the First Department of Surgery of Advanced Training of Doctors named after P. A. Kupriyanov, Military Medical Academy (Saint Petersburg, Russia), ORCID: 0000-0003-0323-0162; **Makaruk Vladimir V.**, Assistant of the Department of Anesthesiology, Intensive Care and Emergency Medical Care (Lugansk, Russia), ORCID: 0000-0001-9884-7135; **Marchenko Sergei P.**, Dr. of Sci. (Med.), Professor of the Department of Faculty Surgery with the Course of Laparoscopic and Cardiovascular Surgery with Clinic, Pavlov University (Saint Petersburg, Russia), ORCID: 0000-0004-5634-9876; **Chupaeva Olga Yu.**, Neonatologist of the Neonatal Department of the Clinic of Obstetrics and Gynecology (Saint Petersburg, Russia), ORCID: 0000-0003-4204-6915; **Volkov Andrey M.**, Associate Professor of the First Department of Surgery of Advanced Training of Doctors named after P. A. Kupriyanov, Military Medical Academy (Saint Petersburg, Russia), ORCID: 0000-0001-7361-3498.