



*Шмальц А.А.^{1,2}, Мартынюк Т.В.^{3,4}, Наконечников С.Н.⁴

РАСЧЕТ ГЕМОДИНАМИКИ МЕТОДОМ ФИКА ПРИ ЛЕГОЧНОЙ ГИПЕРТЕНЗИИ, АССОЦИИРОВАННОЙ С ВРОЖДЕННЫМИ ПОРОКАМИ СЕРДЦА

¹ ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии имени А.Н. Бакулева» Минздрава России, Рублевское шоссе, д. 135, г. Москва 121552, Российская Федерация;

² ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России, ул. Баррикадная, д.2/1, стр.1, г. Москва 125993, Российская Федерация;

³ ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр кардиологии» Минздрава России, ул. 3-я Черепковская, д. 15а, г. Москва 121552, Российская Федерация;

⁴ ФГАОУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова» Минздрава России, ул. Островитянова, д. 1, г. Москва 117997, Российская Федерация.

Сведения об авторах:

*Автор, ответственный за связь с редакцией: Шмальц Антон Алексеевич, д-р мед. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии имени А.Н. Бакулева» Минздрава России; доцент кафедры сердечно-сосудистой хирургии ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России; Рублевское шоссе, д. 135, г. Москва 121552, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-8937-1796>

Мартынюк Тамила Витальевна, д-р мед. наук, руководитель отдела легочной гипертензии и заболеваний сердца, профессор кафедры кардиологии, <https://orcid.org/0000-0002-9022-8097>

Наконечников Сергей Николаевич, д-р мед. наук, профессор кафедры кардиологии, <https://orcid.org/0000-0003-1564-7619>

РЕЗЮМЕ

В декабре 2021 г. на IX Всероссийском конгрессе «Легочная гипертензия – 2021» одобрены первые Евразийские рекомендации по диагностике и лечению легочной гипертензии, ассоциированной с врожденными пороками сердца (ВПС) у взрослых. В данном обзоре экспертная группа представляет основные принципы расчета гемодинамики по Фику для большого и малого кругов кровообращения. Метод незаменим для ВПС. Рассматриваются теоретические и практические аспекты расчета гемодинамики с артериовенозным, веноартериальным и двунаправленным шунтированием. Расчет сердечного индекса каждого из кругов кровообращения выполняется на основании потребления кислорода, кислородной емкости крови и кислородной артериовенозной разницы каждого из кругов кровообращения. Приводятся формулы для расчета сердечного индекса большого и малого кругов кровообращения, сердечного индекса эффективного кровотока, артериовенозного и веноартериального сброса, легочного и периферического сосудистых сопротивлений, а также классическая таблица и формула LaFarge и Miettinen расчетного потребления кислорода в зависимости от пола,

возраста и частоты сердечных сокращений. Обзор иллюстрирован тремя клиническими примерами.

Расчет гемодинамики по Фику следует начинать после знакомства с анатомией и клиникой ВПС: диагнозом, типичными нарушениями гемодинамики, числом и возможным направлением шунтов, сатурацией по пульсоксиметру на руках и ногах; чисто механистический, не учитывающий клиническую картину, подход может снизить информативность и достоверность метода. Несколько ограничивает метод Фику невозможность катетеризации левого предсердия при интактной межпредсердной перегородке. Неточности, возможные при оценке абсолютных показателей непрямым методом Фику, при расчете их относительных значений нивелируются, а значения по достоверности идентичны прямому методу. Метод Фику, ввиду заведомо высокой погрешности, не целесообразно применять при наличии другого, помимо системы легочной артерии, источника легочного кровотока, а также при низкой артериовенозной разнице кругов кровообращения.

Ключевые слова: гемодинамика, метод Фику, врожденные пороки сердца, легочная гипертензия.

Вклад авторов. Все авторы соответствуют критериям авторства ICMJE, принимали участие в подготовке статьи, наборе материала и его обработке.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

✉ SHMALTZANTON@INBOX.RU

Для цитирования: Шмальц А.А., Мартынюк Т.В., Наконечников С.Н. Расчет гемодинамики методом Фику при легочной гипертензии, ассоциированной с врожденными пороками сердца. Евразийский кардиологический журнал. 2022;(2):96-102, <https://doi.org/10.38109/2225-1685-2022-2-96-102>

Рукопись получена: 16.04.2022 | **Рецензия получена:** 26.04.2022 | **Принята к публикации:** 28.04.2022



© Шмальц А.А., Мартынюк Т.В., Наконечников С.Н., 2022

Данная статья распространяется на условиях «открытого доступа», в соответствии с лицензией CC BY-NC-SA 4.0 («Attribution-NonCommercial-ShareAlike» / «Атрибуция-Некоммерчески-СохранениеУсловий» 4.0), которая разрешает неограниченное некоммерческое использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии указания автора и источника. Чтобы ознакомиться с полными условиями данной лицензии на русском языке, посетите сайт: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.ru>



*Anton A. Shmalts^{1,2}, Tamila V. Martynyuk^{3,4}, Sergej N. Nakonechnikov⁴

CALCULATION OF HEMODYNAMICS BY THE FICK METHOD IN PULMONARY HYPERTENSION ASSOCIATED WITH CONGENITAL HEART DEFECTS

¹ A.N. Bakoulev Scientific Center for Cardiovascular Surgery Healthcare Ministry of Russia, 135 Rublevskoe Highway, Moscow 121552, Russian Federation;

² Russian Medical Academy of Continuing Professional Education, 2/1 st. Barrikadnaya, building 1, Moscow 125993, Russian Federation;

³ E.I. Chazov National Medical Research Center Of Cardiology, 3rd Cherepkovskaya street, 15a, Moscow 121552, Russian Federation

⁴ Pirogov Russian National Research Medical University, 1 Ostrovityanova st., Moscow 117997, Russian Federation.

Information about authors:

*Corresponding author: Anton A. Shmalts, Dr. of Sci. (Med.), Leading Research Associate of the Department of Surgical Treatment of Cardiac Diseases with Progressive Pulmonary Hypertension, A.N. Bakoulev Scientific Center for Cardiovascular Surgery Healthcare Ministry of Russia, Moscow, Russian Federation; Associate Professor, Department of Cardiovascular Surgery, Russian Medical Academy of Continuing Professional Education, Moscow, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8937-1796>

Tamila V. Martynyuk, Dr. of Sci. (Med.), Head of the Department of Pulmonary Hypertension and Cardiac Diseases, A.L. Myasnikov Research Institute of Cardiology, E.I. Chazov National Medical Research Center Of Cardiology, Moscow, Russian Federation), <https://orcid.org/0000-0002-9022-8097>

Sergej N. Nakonechnikov, Dr. of Sci. (Med.), Professor, Professor of the Department of Cardiology Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-1564-7619>

SUMMARY

In December, 2021 at the IXth All-Russian Congress «Pulmonary Hypertension – 2021» the first Eurasian guidelines for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension associated with congenital heart disease (CHD) in adults were approved. In this review, the expert group presents the basic principles of calculating hemodynamics according to Fick for the systemic and pulmonary circulation. The method is indispensable for congenital heart defects. Theoretical and practical aspects of calculating hemodynamics with arteriovenous, venoarterial and bidirectional shunting are considered. The calculation of the cardiac index of each of the circles of blood circulation is performed on the basis of oxygen consumption, the oxygen capacity of the blood and the oxygen arteriovenous difference of each of the circles of blood circulation. Formulas are given for calculating the cardiac index of the systemic and pulmonary circulation, the cardiac index of effective blood flow, arteriovenous and venoarterial shunt, pulmonary and peripheral vascular resistance, as well as the classical table and the LaFarge and Miettinen formula for the calculated oxygen consumption depending on gender, age

and heart rate. The review is illustrated with three clinical examples.

Calculation of hemodynamics according to Fick should be started after getting acquainted with the anatomy and clinic of congenital heart disease: diagnosis, typical hemodynamic disorders, number and possible direction of shunts, saturation by pulse oximeter on the arms and legs; a purely mechanistic approach that does not take into account the clinical picture can reduce the information content and reliability of the method. The Fick method is somewhat limited by the impossibility of catheterization of the left atrium with an intact interatrial septum. Inaccuracies that are possible when assessing absolute indicators by the indirect Fick method are leveled when calculating their relative values, and the values are identical in reliability to the direct method. The Fick method, due to the obviously high error, is not advisable to use if there is another source of pulmonary blood flow besides the pulmonary artery system, as well as with a low arteriovenous difference in circulatory circles.

Key words: hemodynamics, Fick method, congenital heart disease, pulmonary hypertension

Authors' contributions. All authors meet the ICMJE criteria for authorship, participated in the preparation of the article, the collection of material and its processing.

Conflict of Interest. No conflict of interest to declare.

✉ SHMALTZANTON@INBOX.RU

For citation: Anton A. Shmalts, Tamila V. Martynyuk, Sergej N. Nakonechnikov. Calculation of hemodynamics by the Fick method in pulmonary hypertension associated with congenital heart defects. Eurasian heart journal. 2022;(2):96-102 (In Russ.). <https://doi.org/10.38109/2225-1685-2022-2-96-102>

Received: 16.04.2022 | **Revision Received:** 26.04.2022 | **Accepted:** 28.04.2022



© Anton A. Shmalts, Tamila V. Martynyuk, Sergej N. Nakonechnikov, 2022

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Метод Фика позволяет отдельно рассчитать гемодинамику большого и малого кругов кровообращения и незаменим для врожденных пороков сердца (ВПС). Принцип расчета гемодинамики по Фику образно иллюстрирован на рисунке 1 [1]. Поезд, олицетворяющий циркуляцию, доставляет кислород (шарики) от легких (колонки) к органам и тканям (городу). Количество кислорода, которым кровь насыщается в легких в единицу времени, *всегда равно* количеству кислорода, который кровь отдает за то же время органам и тканям [1–6].

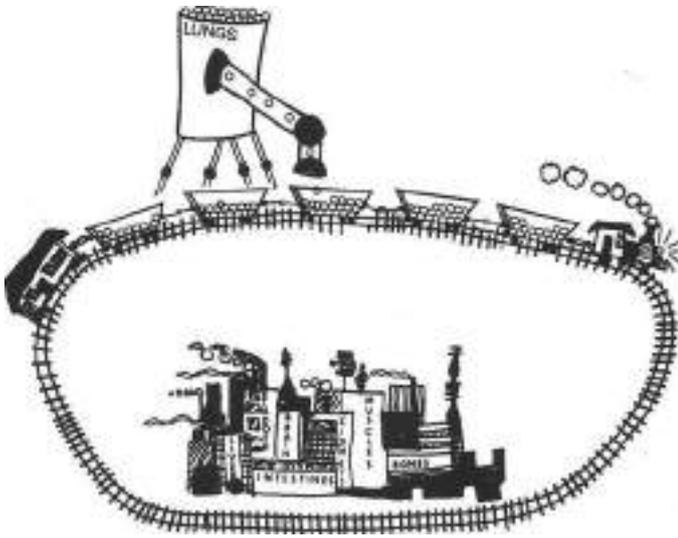


Рисунок 1. Иллюстрация принципа Фика [1]. Пояснение в тексте
Figure 1. Illustration of the Fick principle [1]. Explanation in the text

При подходе к колонке вагоны поезда на 2/3 уже наполнены шариками, поскольку сатурация кислородом ($SatO_2$) венозной крови составляет около 70%. Прирост числа шариков при прохождении поезда под колонкой отражает прирост сатурации венозной крови при превращении ее в артериальную, то есть *артериовенозную разницу малого круга кровообращения*. Зная количество потребляемого кислорода в единицу времени и артериовенозную разницу малого круга кровообращения, легко рассчитать скорость поезда при прохождении под колонкой — *сердечный индекс малого круга кровообращения (СИМКК)*.

При внутрисердечных шунтах *артериовенозная разница большого круга кровообращения* (снижение сатурации артериальной крови при превращении ее в венозную) будет отличаться от артериовенозной разницы малого круга кровообращения. Поэтому и скорость поезда при прохождении через город — *сердечный индекс большого круга кровообращения (СИБКК)* — будет отличаться от его скорости под колонкой.

Расчет сердечного индекса каждого из кругов кровообращения выполняется на основании известных

- потребления организмом кислорода,
- кислородной емкости крови при полном (100%-ном) ее насыщении и
- кислородной артериовенозной разницы конкретного круга кровообращения

по формуле [1–6]:

$$СИ \text{ (л/мин/м}^2\text{)} = \frac{\text{Потребление организмом } O_2 \text{ (л/мин/м}^2\text{)}}{\text{Кислородная емкость крови (мл } O_2\text{/л)} \times \text{Артериовенозная разница по } SatO_2 \text{ на «входе» и «выходе» из круга кровообращения (относительная величина)}}$$

В идеале при расчете гемодинамики *прямым* методом Фика используется истинное потребление кислорода [1–6], измеряемое различными способами в момент забора проб крови из камер сердца (рис. 2). Точность такого расчета максимальна, а метод считается «золотым стандартом».



Рисунок 2. Определение потребления кислорода методом непрямой калориметрии с помощью системы «MedGraphics CCM Express» в момент забора проб из полостей сердца. ФГБУ «НМИЦ ССХ им. А.Н. Бакулева» МЗ РФ
Figure 2. Determination of oxygen consumption by indirect calorimetry using the MedGraphics CCM Express system (B) at the time of sampling from the heart cavities (A). A.N. Bakoulev Scientific Center for Cardiovascular Surgery Healthcare Ministry of Russia.

Ввиду сложности и трудоемкости определения истинного потребления кислорода допускается применять [1–7] расчетные табличные значения (табл. 1 [7]), в этом случае метод Фика называется *непрямым*.

Кровь способна переносить кислород, связанный с гемоглобином и растворенный в плазме. Однако при нормальном атмосферном давлении и дыхании воздухом доля растворенного в плазме кислорода в обеспечении органов и тканей мала (около 1,5%) и ей можно пренебречь [2, 4].

Один грамм гемоглобина крови человека, по различным данным, при полном (100%-ном) насыщении связывает 1,34–1,39 мл кислорода [1–6]; большинство авторов используют значение 1,36 мл. Расчет *кислородной емкости крови* (мл O_2 /л) проводится путем умножения гемоглобина пациента (г/л) на коэффициент 1,36.

Артериовенозная разница круга кровообращения — часть (измеряется в % или как относительный показатель от 1,0) от всего связанного с гемоглобином кислорода, которая отдается в большом круге или приобретает в малом. Артериовенозная разница вычисляется путем вычитания значений $SatO_2$ «на входе» и на «выходе» из круга кровообращения [1–6].

СИМКК и СИБКК вычисляются по формулам [1–6]:

$$СИМКК \text{ (л/мин/м}^2\text{)} = \frac{\text{Потребление организмом } O_2 \text{ (л/мин/м}^2\text{)}}{\text{Кислородная емкость крови (мл } O_2\text{/л)} \times \text{Артериовенозная разница по } SatO_2 \text{ между легочными венами и легочной артерией (относительная величина)}}$$

$$СИБКК \text{ (л/мин/м}^2\text{)} = \frac{\text{Потребление организмом } O_2 \text{ (л/мин/м}^2\text{)}}{\text{Кислородная емкость крови (мл } O_2\text{/л)} \times \text{Артериовенозная разница по } SatO_2 \text{ между аортой и смешанной венозной кровью (относительная величина)}}$$

При ВПС с патологическим сбросом крови СИМКК и СИБКК различаются: при артериовенозном сбросе сердечный индекс малого круга превышает сердечный индекс большого, при ве-

ноартериальном сбросе сердечный индекс большого круга превышает сердечный индекс малого. При ряде ВПС (например, функционально единственном желудочке сердца) возможен двунаправленный патологический сброс как артериальной, так и венозной крови [1–6].

При артериовенозном сбросе кровотоков малого круга кровообращения складывается из полезной венозной части, которая насыщается в легких кислородом, и патологического артериального балласта, не участвующего в газообмене (рис. 3А).

При веноартериальном сбросе кровотоков большого круга складывается из полезной артериальной части, отдающей кислород органам и тканям, и не участвующего в газообмене патологического венозного балласта (рис. 3Б).

Двунаправленный сброс характеризуется патологическим венозным балластом в большом круге и артериальным балластом в малом одновременно (рисунок 3В).

Для расчета величины патологического шунта методом Фика используется понятие так называемого *эффективного кровотока* — чисто артериальной части кровотока большого круга и чисто венозной части кровотока малого круга, то есть гипотетического кровотока каждого из кругов без какой-либо патологической примеси [1–6].

Поскольку количество получаемого в легких кислорода равно количеству расходуемого в органах и тканях, эффективный кровоток большого и малого кругов равны [1–6]. У людей без патологического сброса эффективный кровоток равен также кровотоку большого и малого кругов.

Сердечный индекс эффективного кровотока (СИЭфКр) определяется исходя из артериовенозной разницы между кровью легочных вен и смешанной венозной кровью по формуле [1–6]:

$$\text{СИЭфКр} \left(\frac{\text{л}}{\text{мин}}/\text{м}^2 \right) = \frac{\text{Потребление организмом } O_2 \left(\frac{\text{л}}{\text{мин}}/\text{м}^2 \right)}{\text{Кислородная емкость крови} \left(\frac{\text{мл } O_2}{\text{л}} \right) \times \text{Артериовенозная разница по } \text{Sat}O_2 \text{ между легочными венами и смешанной венозной кровью} \left(\text{относительная величина} \right)}$$

Отношение СИЭфКр/СИМКК (выраженное в % или как часть от 1,0) дает представление о доле венозной крови в легочном кровотоке. Оставшаяся же доля (1,0 минус СИЭфКр/СИМКК) определяет величину патологической артериальной примеси (см. примеры 1, 3).

Аналогично отношению СИЭфКр/СИБКК дает представление о доле артериальной крови в системном кровотоке. Оставшаяся доля (1,0 минус отношение СИЭфКр / СИБКК) определяет величину патологической венозной примеси (см. примеры 2, 3).

Кровь движется в организме по градиенту давления. *Легочное сосудистое сопротивление* (ЛСС) — мера постнагрузки венозного желудочка сердца. Для расчета ЛСС (в единицах Вуда/м²) градиент давления крови на «входе» и «выходе» из малого круга необходимо разделить на СИМКК [1–6]. Расчет выполняется по формуле:

$$\text{ЛСС} \left(\frac{\text{ед. Вуда}}{\text{м}^2} \right) = \frac{\text{Среднее давление в легочной артерии} \left(\text{мм.рт.ст.} \right) - \text{Среднее давление в левом предсердии} \left(\text{мм.рт.ст.} \right)}{\text{СИМКК} \left(\frac{\text{л}}{\text{мин}}/\text{м}^2 \right)}$$

Следует обратить внимание, что ранее использовавшееся понятие «*общелёгочное сопротивление*» (ОЛС) вычислялось по формуле [1, 2]:

$$\text{ОЛС} \left(\frac{\text{ед. Вуда}}{\text{м}^2} \right) = \frac{\text{Среднее давление в легочной артерии} \left(\text{мм.рт.ст.} \right)}{\text{СИМКК} \left(\frac{\text{л}}{\text{мин}}/\text{м}^2 \right)}$$

Поэтому у одного и того же пациента значение ЛСС априори ниже чем ОЛС.

Для расчета *периферического сосудистого сопротивления* (ПСС) — меры постнагрузки системного желудочка сердца — градиент давления на «входе» и «выходе» из большого круга необходимо разделить на СИМКК [1–5]. Расчет выполняется по формуле:

$$\text{ПСС} \left(\frac{\text{ед. Вуда}}{\text{м}^2} \right) = \frac{\text{Среднее давление в аорте} \left(\text{мм.рт.ст.} \right) - \text{Среднее давление в правом предсердии} \left(\text{мм.рт.ст.} \right)}{\text{СИМКК} \left(\frac{\text{л}}{\text{мин}}/\text{м}^2 \right)}$$

Значения ЛСС и ПСС в «единицах Вуда/м²» могут быть переведены в значения «дин х сек х см⁻⁵» путем умножения на коэффициент 80 [1–6].

Расчет гемодинамики по Фику обычно завершается соотношениями ЛСС/ПСС и СИМКК/СИБКК (Qp/Qs в англоязычной литературе).

Пример 1 (рис. 3А). Девочка 3 лет с большим перимембранозным межжелудочковым дефектом, частично прикрытым передней створкой трикуспидального клапана, с артериовенозным сбросом и небольшим межпредсердным дефектом с артериовенозным сбросом. SatO₂ по пульсоксиметру в покое 99–100%. Гемоглобин 130 г/л, кислородная емкость крови 130 х 1,36 = 176,8 млO₂/л, ЧСС во время катетеризации сердца 110 уд/мин, расчетное потребление кислорода (табл. 1) 161 мл/мин/м².

SatO₂, %:
легочная артерия – 89%,
легочные вены – 99%,
восходящая аорта – 99%,
верхняя полая вена – 75%

Давление, мм рт. ст.:
легочная артерия – 90/60 (среднее 70),
левое предсердие – 8,
восходящая аорта – 92/61 (среднее 72),
правое предсердие – 6

$$\text{СИМКК} = \frac{161}{176,8 \times (0,99-0,89)} = 9,1 \left(\frac{\text{л}}{\text{мин}}/\text{м}^2 \right)$$

$$\text{СИБКК} = \frac{161}{176,8 \times (0,99-0,75)} = 3,8 \left(\frac{\text{л}}{\text{мин}}/\text{м}^2 \right)$$

$$\text{СИЭфКр} = \frac{161}{176,8 \times (0,99-0,75)} = 3,8 \left(\frac{\text{л}}{\text{мин}}/\text{м}^2 \right)$$

СИЭфКр/СИМКК = 3,8/9,1 = 0,42
СИЭфКр/СИБКК = 3,8/3,8 = 1,0
Артериовенозный сброс = 1,0-0,42 = 0,58 (58%),
или 9,1-3,8 = 5,3 л/мин/м²
Веноартериальный сброс = 1,0-1,0 = 0 (нет),
или 3,8-3,8 = 0 л/мин/м²

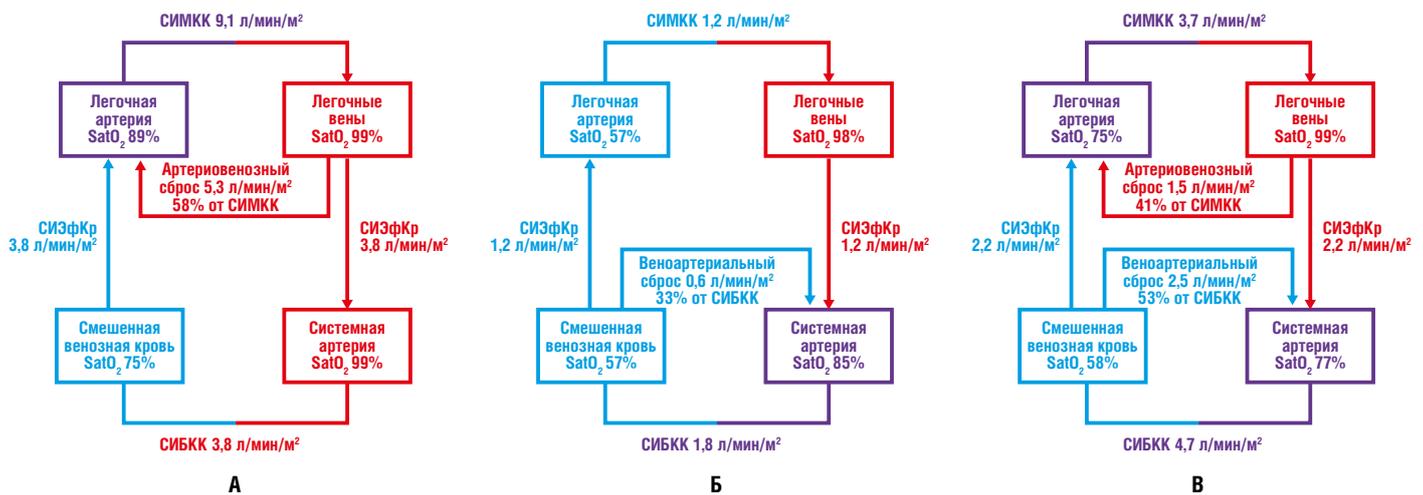


Рисунок 3. Схемы гемодинамики при артериовенозном (А), веноартериальном (Б) и двунаправленном (В) шунтировании крови (см. примеры 1-3, модифицировано по Pepine et al. [2])
 Figure 3. Schemes of hemodynamics in arteriovenous (A), venoarterial (B) and bidirectional (C) blood bypass (see examples 1-3, modified by Pepine et al. [2])

$$ЛСС = \frac{70-8}{9,1} = 6,8 \text{ ед. Вуда/м}^2$$

$$ПСС = \frac{72-6}{3,8} = 17,4 \text{ ед. Вуда/м}^2$$

$$ЛСС/ПСС = 6,8/17,4 = 0,39$$

$$СИММК/СИБКК (Qp/Qs) = 9,1/3,8 = 2,4$$

Пример 2 (рис. 3Б). Мужчина 44 лет с нерестриктивным подортальным межжелудочковым дефектом с веноартериальным сбросом (синдром Эйзенменгера). SatO₂ по пульсоксиметру в покое 83–85%. Гемоглобин 187 г/л, кислородная емкость крови 187 × 1,36 = 254,3 млО₂/л; ЧСС во время катетеризации сердца 83 уд/мин, расчетное потребление кислорода 138,1–11,49 × ln(44) + 0,378 × 83 = 126 мл/мин/м². Катетеризовать левое предсердие не представилось возможным.

SatO₂, %:

- легочная артерия – 57%,
- левое предсердие – 98% (эмпирически принятое значение),
- восходящая аорта – 85%,
- правое предсердие – 57%

Давление, мм рт. ст.:

- легочная артерия – 97/62 (среднее 74),
- левое предсердие (конечно-диастолическое давление левого желудочка, измерено при проведении коронарографии) – 11,
- восходящая аорта – 95/59 (среднее 71),
- правое предсердие – 12

$$СИММК = \frac{126}{254,3 \times (0,98-0,57)} = 1,2 \text{ (л/мин/м}^2\text{)}$$

$$СИБКК = \frac{126}{254,3 \times (0,85-0,57)} = 1,8 \text{ (л/мин/м}^2\text{)}$$

$$СИЭФКр = \frac{126}{254,3 \times (0,98-0,57)} = 1,2 \text{ (л/мин/м}^2\text{)}$$

$$СИЭФКр/СИММК = 1,2/1,2 = 1,0$$

$$СИЭФКр/СИБКК = 1,2/1,8 = 0,67$$

Артериовенозный сброс = 1,0–1,0 = 0 (нет),

или 1,2–1,2 = 0 л/мин/м²

Веноартериальный сброс = 1,0–0,67 = 0,33 (33%),

или 1,8–1,2 = 0,6 л/мин/м²

$$ЛСС = \frac{74-11}{1,2} = 52,5 \text{ ед. Вуда/м}^2$$

$$ПСС = \frac{71-12}{1,8} = 32,8 \text{ ед. Вуда/м}^2$$

$$ЛСС/ПСС = 52,5/32,8 = 1,60$$

$$СИММК/СИБКК (Qp/Qs) = 1,2/1,8 = 0,67$$

Пример 3 (рис. 3В). Мальчик 9 мес. с двуприотчным левым желудочком, транспозиционным расположением магистральных сосудов, дефектом межпредсердной перегородки и стенозом легочной артерии; значимой недостаточности атриовентрикулярных клапанов нет. SatO₂ по пульсоксиметру в покое 75–76%. Гемоглобин 152 г/л, кислородная емкость крови 152 × 1,36 = 206,7 млО₂/л; ЧСС во время катетеризации сердца 118 уд/мин, расчетное потребление кислорода 138,1–11,49 × ln(0,75) + 0,378 × 118 = 186 мл/мин/м².

SatO₂, %:

- легочная артерия – 75%,
- легочные вены – 99%,
- восходящая аорта – 77%,
- верхняя полая вена – 58%

Давление, мм рт. ст.:

- легочная артерия – 15/3 (среднее 7),
- левое предсердие – 3,
- восходящая аорта – 82/57 (среднее 65),
- правое предсердие – 3

$$СИММК = \frac{186}{206,7 \times (0,99-0,75)} = 3,7 \text{ (л/мин/м}^2\text{)}$$

$$СИБКК = \frac{186}{206,7 \times (0,77-0,58)} = 4,7 \text{ (л/мин/м}^2\text{)}$$

$$СИЭФКр = \frac{186}{206,7 \times (0,99-0,58)} = 2,2 \text{ (л/мин/м}^2\text{)}$$

Таблица 1. Классическая таблица LaFarge и Miettinen расчетного потребления кислорода (мл/мин/м²) в зависимости от пола, возраста и частоты сердечных сокращений [6]

Table 1. Classical table of LaFarge and Miettinen calculated oxygen consumption (ml/min/m²) depending on sex, age and heart rate [6]

Возраст, лет	Частота сердечных сокращений, уд/мин												
	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
Пациенты мужского пола													
3				155	159	163	167	171	175	178	182	186	190
4			149	152	156	160	163	168	171	175	179	182	186
6		141	144	148	151	155	159	162	167	171	174	178	181
8		136	141	145	148	152	156	159	163	167	171	175	178
10	130	134	139	142	146	149	153	157	160	165	169	172	176
12	128	132	136	140	144	147	151	155	158	162	167	170	174
14	127	130	134	137	142	146	149	153	157	160	165	169	172
16	125	129	132	136	141	144	148	152	155	159	162	167	
18	124	127	131	135	139	143	147	150	154	157	161	166	
20	123	126	130	134	137	142	145	149	153	156	160	165	
25	120	124	127	131	135	139	143	147	150	154	157		
30	118	122	125	129	133	136	141	145	148	152	155		
35	116	120	124	127	131	135	139	143	147	150			
40	115	119	122	126	130	133	137	141	145	149			
Пациенты женского пола													
3				150	153	157	161	165	169	172	176	180	183
4			141	145	149	152	156	159	163	168	171	175	179
6		130	134	137	142	146	149	153	156	160	165	168	172
8		125	129	133	136	141	144	148	152	155	159	163	167
10	118	122	125	129	133	136	141	144	148	152	155	159	163
12	115	119	122	126	130	133	137	141	145	149	152	156	160
14	112	116	120	123	127	131	134	138	143	146	150	153	157
16	109	114	118	121	125	128	132	136	140	144	148	151	
18	107	111	116	119	123	127	130	134	137	142	146	149	
20	106	109	114	118	121	125	128	132	136	140	144	148	
25	102	106	109	114	118	121	125	128	132	136	140		
30	99	103	106	110	115	118	122	125	129	133	136		
35	97	100	104	107	111	116	119	123	127	130			
50	94	98	102	105	109	112	117	121	124	128			

Примечание: отсутствующие в таблице параметры вычисляются по формулам:

для пациентов мужского пола (мл/мин/м²) = 138,1 – 11,49 × ln (возраст, лет) + 0,378 × (ЧСС, уд/мин),

для пациентов женского пола (мл/мин/м²) = 138,1 – 17,04 × ln (возраст, лет) + 0,378 × (ЧСС, уд/мин),

где ln – натуральный логарифм (вычисляется всеми современными калькуляторами)

Note: the parameters missing in the table are calculated by the formulas:

for males (ml/min/m²) /u003d 138.1 – 11.49 × ln (age, years) + 0.378 × (HR, beats/min),

for females (ml/min/m²) /u003d 138.1 – 17.04 × ln (age, years) + 0.378 × (HR, beats/min),

where ln is the natural logarithm (calculated by all modern calculators)

$$\text{СИЭфКР/СИМКК} = 2,2/3,7 = 0,59$$

$$\text{СИЭфКр/СИБКК} = 2,2/4,7 = 0,47$$

$$\text{Артериовенозный сброс} = 1,0 - 0,59 = 0,41 (41\%),$$

$$\text{или } 3,7 - 2,2 = 1,5 \text{ л/мин/м}^2$$

$$\text{Веноартериальный сброс} = 1,0 - 0,47 = 0,53 (53\%),$$

$$\text{или } 4,7 - 2,2 = 2,5 \text{ л/мин/м}^2$$

$$\text{ЛСС} = \frac{7-3}{3,7} = 1,1 \text{ ед. Вуда/м}^2$$

$$\text{ПСС} = \frac{65-3}{4,7} = 13,2 \text{ ед. Вуда/м}^2$$

$$\text{ЛСС/ПСС} = 1,1/13,2 = 0,08$$

$$\text{СИМКК/СИБКК} (Q_p/Q_s) = 3,7/4,7 = 0,79$$

При катетеризации сердца у больных с ВПС образцы крови на «входе» в большой круг кровообращения могут быть взяты в восходящей аорте или крупной системной артерии (за исключением случаев открытого артериального протока с обратным сбросом), образцы крови на «выходе» из большого круга — по крайней мере на одну камеру сердца «выше» камеры, где имеется шунт (при открытом артериальном протоке и дефекте аорто-легочной перегородки — в правом желудочке, при межжелудочковом дефекте — в правом предсердии, при межпредсердном дефекте — в полых венах, при аномальном дренаже легочных вен — в полых венах «выше» места дренажа). У пациентов без внутрисердечных шунтов идеально смешанной венозной кровью считается кровь легочной артерии [1–6].

Обычно SatO₂ в нижней полой вене несколько выше (за счет крови почечных вен), в верхней полой вене — ниже, а в коронарном синусе — значительно ниже. У индивидуумов без вну-

трисердечных шунтов SatO₂ в верхней полой вене и смешанной венозной крови близки. Поэтому при наличии межпредсердного дефекта или аномального дренажа легочных вен за смешанную венозную кровь принимают кровь верхней полой вены [1, 2, 4, 6].

Образцы крови на «входе» в малый круг кровообращения могут быть взяты из ствола или ветвей легочной артерии (в случае открытого артериального протока или дефекта аорто-легочной перегородки – дистальнее места шунтирования).

Для забора образцов крови на «выходе» из малого круга кровообращения (в левом предсердии или легочных венах) необходим межпредсердный дефект или открытое овальное окно. Если межпредсердная перегородка интактна, катетеризовать левое предсердие не представляется возможным, а SatO₂ в аорте или системной артерии 95% и выше, это значение принимается и за SatO₂ в левом предсердии [1–6]. Причиной незначительного (в пределах 95–99%) снижения SatO₂ артериальной крови могут быть Тебезиевы вены сердца или небольшой внутрилегочный шунт.

Если SatO₂ системной артериальной крови <95%, причина гипоксемии (внутрисердечное, внутрилегочное шунтирование, заболевания легких, депрессия дыхания вследствие глубокой седации и др.) должна быть верифицирована. При отсутствии межпредсердного дефекта, но наличии другого внутрисердечного сброса (и отсутствии патологии легких) SatO₂ в левом предсердии эмпирически принимают за 98%.

Для получения адекватных значений SatO₂ в полостях сердца важен правильный забор и анализ проб крови [1–6]:

- использование катетера с одним дистальным отверстием;
- точное позиционирование и адекватное промывание катетера;
- забор проб за максимально короткий период времени (для исключения возможных изменений гемодинамики) и в момент определения потребления кислорода;
- забор проб при самостоятельном дыхании воздухом (исключить из дыхательной смеси кислород) в состоянии покоя и/или умеренной седации (глубокая седация может сопровождаться неадекватной вентиляцией легких);
- забор проб в гепаринизированные шприцы без остаточных пузырьков воздуха;
- забор двух идентичных проб для верификации данных;
- минимизация времени с момента забора до анализа проб.

Расчет гемодинамики по Фику следует начинать после знакомства с анатомией и клиникой ВПС: диагнозом, типичными для него нарушениями гемодинамики, числом и возможным направлением шунтов, SatO₂ по пульсоксиметру на руках и ногах и др.); чисто механистический, не учитывающий клиническую картину, подход может снизить информативность и достоверность метода [1–6].

Несколько ограничивает метод Фика невозможность катетеризации левого предсердия при интактной межпредсердной перегородке. Неточности, возможные при оценке абсолютных показателей (СИМКК, СИБКК, СИЭфКр, ЛСС и ПСС) непрямым методом Фика, при расчете их относительных значений (СИЭфКр/СИМКК, СИЭфКр/СИБКК, артериовенозный и веноартериальный сброс, ЛСС/ПСС) нивелируются, а значения по достоверности идентичны прямому методу [1–6].

Метод Фика, ввиду заведомо высокой погрешности, не целесообразно применять при наличии другого, помимо системы легочной артерии, источника легочного кровотока (коллатеральные артерии большого круга кровообращения при атрезии легочной артерии, гемитрункус и др.), а также при низкой артериовенозной разнице кругов кровообращения (транспозиция магистральных сосудов, дыхание 100%-м кислородом и др.) [1–6, 8]. Дыхание 100%-м кислородом ограничивает метод Фика и за счет повышения (до 8–14%) доли растворенного в плазме кислорода в обеспечении органов и тканей [2, 4, 8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grossman & Baim's. *Cardiac Catheterization, Angiography, and Intervention. Eighth edition.* Lippincott Williams & Williams; 2014. ISBN 978-1-4511-2740-9
2. Pepine CJ, Hill JA, Lambert CR (eds). *Diagnostic and therapeutic cardiac catheterization. Second edition.* Williams & Wilkins; 1994. ISBN 0-683-06845-8
3. Chessa M. *Cardiac Catheterization.* In: Dimopoulos K, Diller GP (eds). *Pulmonary Hypertension in Adult Congenital Heart Disease.* Springer; 2017. ISBN: 978-3-319-46028-4, ISBN 978-3-319-46026-0, <https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-46028-4>
4. Grifka RG. *Cardiac Catheterization and Angiography.* In: Allen HD, Driscoll DJ, Shaddy RE, Feltes TF (eds). *Moss and Adams' Heart Disease in Infants, Children, and Adolescents. Seventh Edition.* Lippincott Williams & Wilkins; 2008. ISBN 978-0-7817-8684-3
5. Mullins CE. *Cardiac Catheterization in Congenital Heart Disease: pediatric and adult.* Blackwell; 2007. <http://dx.doi.org/10.1002/9780470986967>, ISBN 978-1-4051-2200-9
6. Шмальц А.А., Нишонон Н.А. Эндоваскулярная диагностика легочной гипертензии, ассоциированной с врожденными пороками сердца. Часть 2. Расчет гемодинамики методом Фика. Эндоваскулярная хирургия. 2021; 8(4): 339-46 [A.A. Shmalts, Nishonov N.A. Endovascular diagnosis of pulmonary hypertension associated with congenital heart disease. Part 2. Calculation of hemodynamics by the Fick method. *Endovascular surgery.* 2021; (4):339-346. (In Russ.)], <https://www.doi.org/10.24183/2409-4080-2021-8-4-339-346>
7. LaFarge CG, Miettinen OS. The estimation of oxygen consumption. *Cardiovasc Res.* 1970; 4(1):23-30. <https://www.doi.org/10.1093/cvr/4.1.23>
8. Del Cerro MJ. *Cardiac catheterization in children with pulmonary hypertensive vascular disease: consensus statement from the Pulmonary Vascular Research Institute, Pediatric and Congenital Heart Disease Task Forces.* *Pulm Circ.* 2016; 6(1):118-25. <https://www.doi.org/10.1086/685102>