



© CC Коллектив авторов, 2025

<https://doi.org/10.24884/2078-5658-2025-22-4-86-92>

Возможности мониторинга кардиореспираторной системы с помощью непрямой калориметрии при проведении периферической вено-артериальной экстракорпоральной мембранной оксигенации у пациента после экстренного кардиохирургического вмешательства

А. А. ЕРЕМЕНКО^{1,2}, Л. С. СОРОКИНА^{1*}, Э. Р. ЧАРЧЯН¹, М. А. БАБАЕВ¹, С. С. ЮДИНА¹, С. В. ФЕДУЛОВА¹, М. Н. КАБАНОВА¹

¹ Российский научный центр хирургии им. академика Б. В. Петровского, Москва, Российская Федерация

² Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский университет), Москва, Российская Федерация

Поступила в редакцию 27.02.2025 г.; дата рецензирования 13.04.2025 г.

РЕЗЮМЕ

Введение. Кардиогенный шок после кардиохирургических вмешательств относится к числу наиболее тяжелых осложнений.

Цель – продемонстрировать возможности непрямой калориметрии в комплексной оценке динамики кардиореспираторного транспорта кислорода во время периферической вено-артериальной экстракорпоральной мембранной оксигенации (ВА ЭКМО) у пациента с тяжелой сердечной недостаточностью после экстренного кардиохирургического вмешательства.

Заключение. Комплексная оценка кардиореспираторного транспорта кислорода с использованием непрямой калориметрии может дать важную информацию, расширяющую возможности диагностики метаболических нарушений при синдроме низкого сердечного выброса, что позволит эффективно управлять медикаментозной терапией и механической поддержкой ослабленного сердца.

Ключевые слова: непрямая калориметрия, метаболизм миокарда, потребление кислорода, экстракорпоральная мембранная оксигенация, сердечная недостаточность

Для цитирования: Еременко А. А., Сорокина Л. С., Чарчян Э. Р., Бабаев М. А., Юдина С. С., Федуллова С. В., Кабанова М. Н. Возможности мониторинга кардиореспираторной системы с помощью непрямой калориметрии при проведении периферической вено-артериальной экстракорпоральной мембранной оксигенации у пациента после экстренного кардиохирургического вмешательства // Вестник анестезиологии и реаниматологии. – 2025. – Т. 22, № 4. – С. 86–92. <https://doi.org/10.24884/2078-5658-2025-22-4-86-92>.

Cardiorespiratory monitoring capabilities using indirect calorimetry during peripheral veno-arterial extracorporeal membrane oxygenation in a patient following emergency cardiac surgery

ALEXANDER A. EREMENKO^{1,2}, LYUBOV S. SOROKINA^{1*}, EDWARD R. CHARCHYAN¹, MAXIM A. BABAEV¹, SOFIA S. YUDINA¹, SVETLANA V. FEDULOVA¹, MARINA N. KABANOVA¹

¹ Petrovsky National Research Center of Surgery, Moscow, Russia

² I. M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russia

Received 27.02.2025; review date 13.04.2025

ABSTRACT

Introduction. Cardiogenic shock after cardiac surgery refers to the one of the most severe complications.

The objective was to demonstrate the potential of indirect calorimetry in the comprehensive assessment of cardiopulmonary oxygen transport dynamics during peripheral veno-arterial

extracorporeal membrane oxygenation (VA-ECMO) in a patient with severe heart failure following emergency cardiac surgery.

Conclusion. The comprehensive evaluation of cardiopulmonary oxygen transport using indirect calorimetry provides valuable information, broadening the diagnostic capabilities for metabolic disturbances in low cardiac output syndrome. This approach allows for effective management of pharmacological therapy and mechanical support of the compromised heart.

Keywords: indirect calorimetry, myocardial metabolism, oxygen consumption, extracorporeal membrane oxygenation, heart failure

For citation: Eremenko A. A., Sorokina L. S., Charchyan E. R., Babaev M. A., Yudina S. S., Fedulova S. V., Kabanova M. N. Cardiorespiratory monitoring capabilities using indirect calorimetry during peripheral veno-arterial extracorporeal membrane oxygenation in a patient following emergency cardiac surgery. *Messenger of Anesthesiology and Resuscitation*, 2025, Vol. 22, № 4, P. 86–92. (In Russ.). <https://doi.org/10.24884/2078-5658-2025-22-4-86-92>.

* Для корреспонденции:
Любовь Сергеевна Сорокина
E-mail: soroka300@gmail.com

* Correspondence:
Lyubov S. Sorokina
E-mail: soroka300@gmail.com

Введение

Кардиогенный шок (КШ) после кардиохирургических вмешательств относится к числу наиболее тяжелых осложнений, и характеризуется выражен-

ным снижением перфузии тканей и доставки кислорода (DO_2) вследствие снижения сократимости миокарда, метаболическими нарушениями и дисрегуляторным системным воспалительным ответом с последующей полиорганной дисфункцией [22].

Общая госпитальная летальность от КШ остается очень высокой, по данным регистра Critical Care Cardiology Trials Network Registry (2021), она составляет около 40% [12] и зависит от его стадии [23].

Современные подходы к терапии тяжелого КШ включают в себя экстракорпоральную поддержку жизнеобеспечения, в том числе применение экстракорпоральной мембранной оксигенации (ЭКМО) [17], частота применения которой у кардиохирургических больных возросла в 40 раз [5], а у кардиохирургических пациентов составляет от 5% до 20% [19].

Успешное использование ВА ЭКМО зависит не только от своевременного начала механической поддержки, но и от эффективного контроля за потенциальными осложнениями и процессами восстановления тканевого метаболизма на всех этапах ее использования [7, 16].

Несмотря на совершенствование систем инвазивного и неинвазивного мониторинга, на настоящий момент нет оптимальных способов комплексного контроля объема необходимой и достаточной перфузии, показателей тканевого метаболизма и эффективности восстановления сократительной функции различных отделов сердца [29].

В данной статье представлен клинический случай успешного применения периферического ВА ЭКМО у пациента с тяжелой бивентрикулярной недостаточностью и полиорганной дисфункцией после экстренного кардиохирургического вмешательства с использованием непрямой калориметрии.

Клиническое наблюдение

Пациент 36 лет, поступил в ГНЦ ФГБНУ «РНЦХ имени академика Б. В. Петровского» с диагнозом: «Острое расслоение аорты 1 типа по De Bakey с распространением на брахиоцефальный ствол, правую общую сонную артерию и правую подключичную артерию. Аневризма корня и восходящего отдела аорты. Аортальная недостаточность 3 степени. Гемоперикард».

Заболел остро, когда внезапно появились загрудинные боли, слабость, тошнота, рвота, сопровождающиеся длительной потерей сознания. При проведении компьютерной томографии органов грудной клетки был установлен вышеуказанный диагноз. В экстренном порядке пациент был переведен в РНЦХ для проведения оперативного вмешательства. Больному выполнена гибридная операция: стентирование нисходящей грудной аорты гибридным протезом, протезирование дуги аорты, левой подключичной артерии, левой общей сонной артерии и правой общей сонной артерии сосудистым протезом в условиях искусственного кровообращения (ИК), циркуляторного ареста, бигемиферальной перфузии головного мозга и умеренной гипотермии 28 °С, протезирование аортального клапана и восходящего отдела аорты по методике Bentall-De Bono (оперирующий хирург Э. Р. Чарчян, анестезиолог А. В. Гришин) [1, 2].

В связи с отслоением интимы, захватывающей правую и левую коронарные артерии, сопровождающейся нестабильной гемодинамикой и акинезом выходного тракта и гипокинезом свободной стенки и приточного отдела правого желудочка, выполнено протезо-коронарное шунтирование правой коронарной артерии, что позволило снизить производительность ИК и отключиться от него. После стабилизации гемодинамики больной был переведен в ОРИТ.

Послеоперационный период. В ранний послеоперационный период требовалось введение высоких доз катехоламинов (норэпинефрин до 600 нг·кг⁻¹·мин⁻¹, добутамин до 8 мкг·кг⁻¹·мин⁻¹, допамин 3 мкг·кг⁻¹·мин⁻¹). Отмечались: пароксизмы трепетания предсердий с ЧСС 150 уд./мин, лактат-ацидоз (лактат 9,5 ммоль/л), тенденция к олигоанурии. На ЭХО-КГ выявлено расширение правых камер сердца, акинез свободной стенки правого желудочка (ПЖ), гипо-акинез перегородочной стенки, задней и нижней стенок левого желудочка (ЛЖ). Таким образом, тяжесть состояния пациента объяснялась инфарктом миокарда с развитием синдрома низкого сердечного выброса, требующего введения высоких доз кардиотоников и вазопрессоров.

Для оценки кардиореспираторного транспорта кислорода был использован метод непрямой калориметрии с помощью аппарата Quark RMR (COSMED Omnia, Италия). Исследования проводили в течение 20 мин, в состоянии покоя пациента, при неизменных параметрах ИВЛ и уровне седации по шкале RASS-5 (шкала пробуждения и седации Ричмонда). Были зафиксированы повышенные показатели потребления кислорода (показатель $\dot{V}O_2I$ составил 255 мл·мин⁻¹·м⁻²) при нормальных цифрах $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_2I - 450$ мл/мин/м²) и коэффициента экстракции кислорода ($O_2ER - 34\%$) (таблица, рисунок).

К концу 1-х суток доза добутамина снижена до 2 мкг·кг⁻¹·мин⁻¹, норэпинефрина до 500 нг·кг⁻¹·мин⁻¹, допамин 2 мкг·кг⁻¹·мин⁻¹, лактат 2,5 ммоль/л.

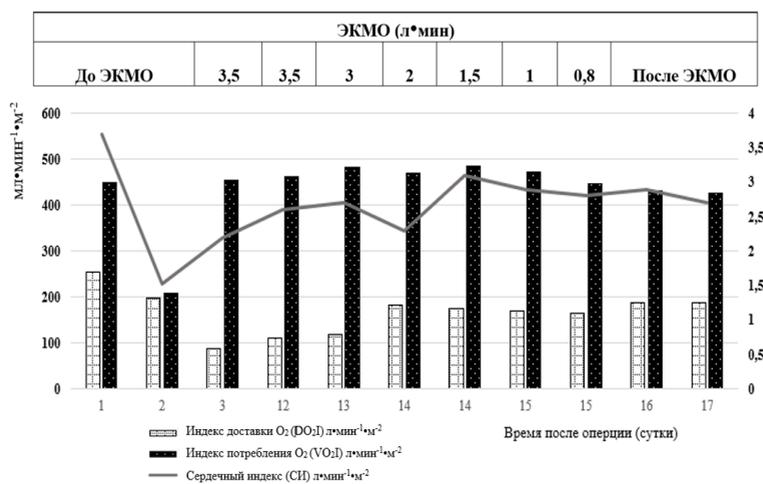
На 2-е послеоперационные сутки отмечено критическое снижение показателей кислородтранспортной функции и метаболизма: $\dot{V}O_2I$ на 50%, $\dot{V}O_2I$ – на 21% (с 252 до 199 мл·мин⁻¹·м⁻²), O_2ER с 34 до 53%, уровень лактата артериальной крови возрос до 5 ммоль/л. По ЭХО-КГ отмечена отрицательная динамика: расширение правых камер сердца, акинез свободной стенки ПЖ, гипоакинез перегородочной стенки, задней и нижней стенок ЛЖ, снижение СВ до 3 л/мин (таблица).

С целью обеспечения адекватной перфузии начала ВА ЭКМО (аппарат Xenios Console, Германия) с производительностью 3,5 л/мин (40 мл·кг⁻¹·мин⁻² – 75% от расчетного СВ). На момент подключения ВА ЭКМО прогноз по шкале выживаемости SAVE составил –2 балла (диапазон бальной оценки –4 до 0), что соответствует III классу риска и прогнозируемой госпитальной выживаемости 42%. С началом механической поддержки дозы катехоламинов были значительно снижены (допамин 2 мкг·кг⁻¹·мин⁻¹, норэпинефрин 50 нг·кг⁻¹·мин⁻¹, добутамин отклю-

Динамика показателей метаболизма и доз инотропных препаратов
Dynamics of metabolic parameters and doses of inotropic drugs

Показатель	Послеоперационные сутки											
	1	2	2	12	13	14	14	15	15	16	17	
ЭКМО (л/мин)	–	–	3,5	3,5	3	2	1,5	1	0,8	–	–	
Индекс доставки O ₂ (DO ₂ I), мл·мин ⁻¹ ·м ⁻² *	450	209	454	462	482	470	486	472	448	432	426	
Коэффициент экстракции кислорода (O ₂ ER) %**	34	52	54	38	35	32,3	28	34	38	36	31	
Лактат крови, ммоль/л	9,5	5	4,3	1,9	1,8	1,4	1,4	0,8	2	1,2	1,1	
Добутамин, мкг·кг ⁻¹ ·мин ⁻¹	8	4	1	–	–	–	–	2	1	–	–	
Дофамин, мкг/кг/мин	3	2	2	2	2	–	–	–	–	–	–	
Норэпинефрин, нг мкг·кг ⁻¹ ·мин ⁻¹	600	600	500	50	50	30	–	–	–	100	100	

Примечание: * – коэффициент экстракции кислорода (%): $O_2ER = VO_2/DO_2 = CB \times Hb \times (SaO_2 - SvO_2) \times 1,34 / CB \times (Hb \times SaO_2) \times 1,34 = (SaO_2 - SvO_2) / SaO_2$; ** – глобальная доставка O₂ (мл·мин⁻¹·м⁻²): $DO_2 = CB (ЭКМО + CB \text{ ЭХО-КГ}) \times (Hb \times SaO_2 \times 1,34) + (PaO_2 \times 0,003) = CB \times CaO_2$.



Динамика показателей функции кардиореспираторной системы на фоне проводимой ЭКМО
Dynamics of the patient's cardiorespiratory system during ECMO

чен). При этом: DO₂I возрос на 54%, VO₂I снизился в 2 раза и составил 88 мл·мин⁻¹·м⁻². В связи с преобладанием правожелудочковой сердечной недостаточности на 3-и п/о сутки проведена инфузия левосимендана в дозе 0,1 мкг·кг⁻¹·мин⁻¹.

К 4-м послеоперационным суткам тяжесть состояния по шкале SOFA составила 12 баллов и была обусловлена развитием вторичной полиорганной дисфункции, в составе которой: сердечно-сосудистая недостаточность, требующая поддержки ВА ЭКМО и инфузии катехоламинов (дофамин 2 мкг·кг⁻¹·мин⁻¹); дыхательная недостаточность на фоне гнойного трахеобронхита; почечно-печеночная недостаточность (креатинин 180 мкмоль/л, мочевины 18,5 ммоль/л, билирубин 63 мкмоль/л, АЛТ 4640,50 Ед/л, АСТ 7419 Ед/л). Учитывая анурию и нарастание уровня креатинина крови, проводили заместительную почечную терапию в режиме пролонгированной гемодиализации (выполнено 5 сеансов). В результате сохраняющейся гиперферментемии (АСТ и АЛТ 4650 и 9760 Ед/л соответственно), повышение миоглобина крови до 18000 мкг/л, выполнено 2 сеанса плазмообмена с замещением одного объема циркулирующей плазмы.

На 8-е послеоперационные сутки по данным ЭХО-КГ определялись признаки выраженного

сдавления ствола легочной артерии осумкованной гематомой в перикарде, толщиной до 7 см. Выполнена рестернотомия, ревизия и санация перикарда, удаление гематомы.

На 12-е послеоперационные сутки при контрольном ЭХО-КГ отмечено улучшение функции ПЖ, восстановление сократительной способности ЛЖ. При этом: VO₂I составил 111 мл·мин⁻¹·м⁻², DO₂I поддерживался в пределах 450–470 мл·мин⁻¹·м⁻², метаболических нарушений не отмечалось.

На 13-е послеоперационные сутки под контролем ЭХО-КГ, непрямой калориметрии и газового анализа крови начато постепенное уменьшение производительности ЭКМО. По мере снижения производительности на 500 мл/мин в сутки, при неизменных цифрах DO₂I, наблюдалось повышение VO₂I с 111 до 188 мл·мин⁻¹·м⁻² (рисунок).

На 15-е послеоперационные сутки на фоне производительности 0,8 л/мин (СИ 2,8–2,9 л·мин⁻¹·м⁻²) и стабильные показатели метаболизма (VO₂I – 165 мл/мин/м², DO₂I – 448 мл·мин⁻¹·м⁻²) принято решение о полном прекращении вено-артериального обхода сердца.

При контрольных измерениях (через 2 и 24 часа после деканюляции) отмечались стабильные цифры VO₂I (182–188 мл·мин⁻¹·м⁻²), DO₂I

(426–432 мл·мин⁻¹·м⁻²) и O₂ER (31%). По данным ЭХО-КГ: КДО ЛЖ 158 мл, КСО ЛЖ 80 мл, УО ЛЖ 78 мл, СИ 3 л·мин⁻¹·м⁻², ФИ ЛЖ 49%, незначительное парадоксальное сокращение межжелудочковой перегородки, акинез нижне-перегородочных сегментов ЛЖ, локальная систолическая функция ПЖ не нарушена.

После нормализации клинико-лабораторных данных, отлучения от ИВЛ, на 24-е сутки пациент переведен в профильное хирургическое отделение.

Обсуждение

Настоящий клинический пример демонстрирует несколько важных моментов, касающихся успешного использования ВА ЭКМО у пациентов с КШ, осложнившимся кардиохирургическое вмешательство.

Во-первых, до момента подключения ВА ЭКМО, при мониторинге основных гемодинамических параметров и показателей непрямой калориметрии был определен момент резкого падения DO₂ и VO₂, повышение O₂ER, тенденция к росту уровня лактата крови, отсутствие эффекта от увеличения инотропной и вазопрессорной поддержки, а также олигоанурия. Данные показатели свидетельствовали о нарушении биоэнергетики миокарда, запуске анаэробного обмена и перфузионно-метаболическом несоответствии в инфарктной зоне. Полученные результаты позволили своевременно провести дополнительную диагностику (ЭХО-КГ) и незамедлительно начать вспомогательную механическую поддержку.

Во-вторых, применение ВА ЭКМО с неполной производительностью (60–75%) от расчетной, при изначально превалирующей правожелудочковой сердечной недостаточности, позволило эффективно разгрузить правые отделы сердца и предотвратить увеличение нагрузки на ЛЖ сердца.

В-третьих, присоединение к кардиотонической терапии инодиллятора – левосимендана – привело к постепенному восстановлению сократительной функции миокарда ПЖ, дилатации сосудов малого круга кровообращения, возможности адекватного заполнения левого предсердия и, соответственно, адекватной перфузии органов за счет увеличения работы ЛЖ и улучшения насосной функции ПЖ [13].

В целом, проведение коррекции сердечной недостаточности с помощью вспомогательного кровообращения позволяет снизить дозы инотропных и вазопрессорных препаратов, оказывает положительное влияние на органную перфузию и способствует снижению числа неблагоприятных исходов лечения [21, 24]. В нашем клиническом случае все это стало возможно благодаря комплексному мониторингу структур и функции сердца (ЭХО КГ), адекватности перфузии тканей и оценке тканевого метаболизма при использовании метода непрямой калориметрии.

На данный момент не существует стандартных стратегий отлучения от ВА ЭКМО, а оценка соб-

ственного СВ при данной ситуации является одной из сложных задач [8, 10]. Применение метода термодилуции в условиях ВА ЭКМО является неоправданным в связи с ожидаемыми потерями индикатора в экстракорпоральном контуре и, соответственно, неправильной оценке собственного сердечного выброса пациента [6]. Эхокардиография является наиболее широко используемым методом мониторинга гемодинамики и играет основополагающую роль на каждом этапе механической поддержки. Однако к ее недостаткам можно отнести субъективность интерпретации результатов исследования (методика является оператор-зависимой), трансторакальная ЭХО-КГ зачастую невозможна из-за затрудненной эхолокации, а чрезпищеводная ЭХО-КГ чревата высокими рисками кровотечений при ранении слизистой пищевода на фоне проводимой антикоагулянтной терапии [20, 25].

В качестве альтернативы все чаще рассматривается непрямая калориметрия, позволяющая проводить неинвазивный контроль основных показателей метаболического обмена, а VO₂, полученное с помощью данного метода, является сегодня признанной составляющей мониторинга у больных в критическом состоянии [3, 11, 15, 18, 26, 27, 28, 30]. Несмотря на большое количество работ по проблемам метаболического мониторинга в ОРИТ различного профиля, исследований, посвященных изучению энергетических потребностей миокарда у пациентов при проведении ЭКМО, крайне мало [3, 14, 28]. Кроме того, необходимо соблюдать условия проведения исследования, к числу которых относится поддержание глубины седации, стабильные режимы ИВЛ с фракцией кислорода во вдыхаемой смеси более 60% и ПДКВ не более 12 мм рт. ст. [26].

Учитывая, что повышение метаболической нагрузки позволяет выявить резервные возможности миокарда пациента, а уровень VO₂ на ранней стадии критического состояния предсказывает исход заболевания, нами было установлено, что при снижении параметров производительности ЭКМО или повышении доз инотропных препаратов отмечалось пропорциональное повышение VO₂, что является предиктором благоприятного результата проводимого лечения [4]. Несоответствие между VO₂ и DO₂ было зафиксировано на II этапе исследования, непосредственно перед началом ВА ЭКМО, а в дальнейшем на фоне бивентрикулярного обхода с оксигенацией показатели кардиореспираторной функции оставались стабильными, что позволило отойти от вспомогательного кровообращения без увеличения кардиотонической поддержки.

Заключение

Экстракорпоральная поддержка у пациентов в критических состояниях требует комплексного подхода, основанного на оценке динамических изменений параметров гомеостаза в процессе проведения интенсивной терапии. Оценка кардио-

респираторного транспорта кислорода с использованием непрямой калориметрии может дать важную информацию, расширяющую возможности диагностики метаболических нарушений

при синдроме низкого сердечного выброса, что позволит эффективно управлять медикаментозной терапией и механической поддержкой ослабленного сердца.

Конфликт интересов: Еременко А. А. является членом редакционной коллегии журнала ВАиР с 2018 г., но к решению об опубликовании данной статьи отношения не имеет. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли.

Conflict of Interests. Eremenko A. A. has been a member of the editorial board of the Messenger of Anesthesiology and Resuscitation since 2018, but has nothing to do with the decision to publish this article. The article has passed the review procedure accepted in the journal. The authors did not declare any other conflicts of interest.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени участвовали в подготовке публикации: разработке концепции статьи, получении и анализе фактических данных, написании и редактировании текста статьи, проверке и утверждении текста статьи.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов Ю. В., Абугов С. А., Чарчян Э. Р. Применение «гибридных» технологий при лечении больных с расслоением всей аорты // Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. – 2008. – № 1. – С. 80–83.
2. Белов Ю. В., Чарчян Э. Р., Степаненко А. Б. и др. Опыт хирургического лечения больных с расслоением аорты I-го типа по DeBakey // Хирургия. Журнал им. Н. И. Пирогова. – 2018. – Т. 7. – С. 8–17. <https://doi.org/10.17116/hirurgia201878>.
3. Сорокина Л. С., Юдина С. С., Петров А. С., Еременко А. А. Возможности метаболического мониторинга методом непрямой калориметрии в условиях отделения анестезиологии, реанимации и интенсивной терапии. Обзор результатов международных и российских исследований // Восстановительные биотехнологии, профилактическая, цифровая и предиктивная медицина. – 2024. – Т. 1, № 4. – С. 20–26. <https://doi.org/10.17116/rbpdpm2024104120>.
4. Сорокина Л. С., Юдина С. С., Петров А. С. и др. Объективная оценка динамики реальной энергетической потребности миокарда методом непрямой калориметрии у кардиохирургических пациентов в раннем послеоперационном периоде // Хирургия. Журнал им. Н. И. Пирогова. – 2024. – Т. 2, № 12. – С. 50–57. <https://doi.org/10.17116/hirurgia202412250>.
5. Becher P. M., Schrage B., Sinning C. R. et al. Venous arterial extracorporeal membrane oxygenation for cardiopulmonary support // Circulation. – 2018. – Vol. 138, № 20. – P. 2298–2300. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.118.036691>.
6. Berger D., Stanger E. J., Jenni H. et al. modified thermodilution for simultaneous cardiac output and recirculation assessment in veno-venous extracorporeal membrane oxygenation: a prospective diagnostic accuracy study // Anesthesiology. – 2024. – Vol. 140, № 5. – P. 1002–1015. <https://doi.org/10.1097/ALN.0000000000004895>.
7. Bhatia M., Katz J. N. Contemporary Comprehensive Monitoring of Venous-arterial Extracorporeal Membrane Oxygenation Patients // Can J Cardiol. – 2020. – Vol. 36, № 2. – P. 291–299. <https://doi.org/10.1016/j.cjca.2019.10.031>. PMID: 31924449.
8. Castro D. M., Morris I., Teijeiro-Paradis R. et al. Monitoring during extracorporeal membrane oxygenation // Curr Opin Crit Care. – 2022. – Vol. 28, № 3. – P. 348–359. <https://doi.org/10.1097/MCC.0000000000000939>.
9. Chung M., Shiloh A. L., Carlese A. Monitoring of the adult patient on venous-arterial extracorporeal membrane oxygenation // Scientific World Journal. – 2014. – 393258. <https://doi.org/10.1155/2014/393258>.
10. Douflé G., Ferguson N. D. Monitoring during extracorporeal membrane oxygenation // Curr Opin Crit Care. – 2016. – Vol. 22, № 3. – P. 230–238. <https://doi.org/10.1097/MCC.0000000000000309>.
11. Epstein C. D., Peerless J. R., Martin J. E. et al. Comparison of methods of measurements of oxygen consumption in mechanically ventilated patients with multiple trauma: the Fick method versus indirect calorimetry // Crit Care Med. – 2000. – Vol. 28, № 5. – P. 1363–1369. <https://doi.org/10.1097/00003246-200005000-00017>.

REFERENCES

1. Belov Yu. V., Abugov S. A., Charchyan E. R. The use of “hybrid” technologies in the treatment of patients with dissection of the entire aorta. *Cardiology and cardiovascular surgery*, 2008, vol. 1, pp. 80–83. (In Russ.).
2. Belov Yu. V., Charchian É. R., Stepanenko A. B. et al. Surgical treatment of DeBakey type 1 aortic dissection. *Pirogov Russian Journal of Surgery*, 2018, no. 7, pp. 8–17. (In Russ.).
3. Sorokina L. S., Yudina S. S., Petrov A. S., Eremenko A. A. Indirect calorimetry for metabolic monitoring in intensive care units. *Regenerative Biotechnologies, Preventive, Digital and Predictive Medicine*, 2024, vol. 1, no. 4, pp. 20–26. (In Russ.).
4. Sorokina L. S., Yudina S. S., Petrov A. S. et al. Assessment of real myocardial energy demand using indirect calorimetry in early postoperative period after cardiac surgery. *Pirogov Russian Journal of Surgery*, 2024, vol. 2, no. 12, pp. 50–57. (In Russ.).
5. Becher P. M., Schrage B., Sinning C. R. et al. Venous arterial extracorporeal membrane oxygenation for cardiopulmonary support. *Circulation*, 2018, vol. 138, no. 20, pp. 2298–2300. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.118.036691>.
6. Berger D., Stanger E. J., Jenni H. et al. modified thermodilution for simultaneous cardiac output and recirculation assessment in veno-venous extracorporeal membrane oxygenation: a prospective diagnostic accuracy study. *Anesthesiology*, 2024, vol. 140, no. 5, pp. 1002–1015. <https://doi.org/10.1097/ALN.0000000000004895>.
7. Bhatia M., Katz J. N. Contemporary Comprehensive Monitoring of Venous-arterial Extracorporeal Membrane Oxygenation Patients. *Can J Cardiol*, 2020, vol. 36, no. 2, pp. 291–299. <https://doi.org/10.1016/j.cjca.2019.10.031>. PMID: 31924449.
8. Castro D. M., Morris I., Teijeiro-Paradis R. et al. Monitoring during extracorporeal membrane oxygenation. *Curr Opin Crit Care*, 2022, vol. 28, no. 3, pp. 348–359. <https://doi.org/10.1097/MCC.0000000000000939>.
9. Chung M., Shiloh A. L., Carlese A. Monitoring of the adult patient on venous-arterial extracorporeal membrane oxygenation. *Scientific World Journal*, 2014, 393258. <https://doi.org/10.1155/2014/393258>.
10. Douflé G., Ferguson N. D. Monitoring during extracorporeal membrane oxygenation. *Curr Opin Crit Care*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 230–238. <https://doi.org/10.1097/MCC.0000000000000309>.
11. Epstein C. D., Peerless J. R., Martin J. E. et al. Comparison of methods of measurements of oxygen consumption in mechanically ventilated patients with multiple trauma: the Fick method versus indirect calorimetry. *Crit Care Med*, 2000, vol. 28, no. 5, pp. 1363–1369. <https://doi.org/10.1097/00003246-200005000-00017>.

12. Hall E. J., Agarwal S., Cullum C. M. et al. Survivorship after cardiogenic shock // *Circulation*. – 2025. – Vol. 151, № 3. – P. 257–271. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.124.068203>.
13. Harjola V. P., Mebazaa A., Čelutkienė J. et al. Contemporary management of acute right ventricular failure: a statement from the Heart Failure Association and the Working Group on Pulmonary Circulation and Right Ventricular Function of the European Society of Cardiology // *Eur J Heart Fail*. – 2016. – Vol. 18, № 3. – P. 226–41. <https://doi.org/10.1002/ehf.478>.
14. Hoeyer-Nielsen A. K., Holmberg M. J., Grossestreuer A. V. et al. Association between the oxygen consumption: lactate ratio and survival in critically ill patients with sepsis // *Shock*. – 2021. – Vol. 55, № 6. – P. 775–781. <https://doi.org/10.1097/SHK.0000000000001661>.
15. Inadomi C., Terao Y., Yamashita K. et al. Comparison of oxygen consumption calculated by Fick's principle (using a central venous catheter) and measured by indirect calorimetry // *J Anesth*. – 2008. – Vol. 22, № 2. – P. 163–166. <https://doi.org/10.1007/s00540-007-0588-9>.
16. Keebler M. E., Haddad E. V., Choi C. W. Et al. Venoarterial extracorporeal membrane oxygenation in cardiogenic shock // *JACC Heart Fail*. – 2018. – Vol. 6, № 6. – P. 503–516. <https://doi.org/10.1016/j.jchf.2017.11.017>. PMID: 29655828.
17. Keller S. P. Management of peripheral venoarterial extracorporeal membrane oxygenation in cardiogenic shock // *Crit Care Med*. – 2019. – Vol. 47, № 9. – P. 1235–1242. <https://doi.org/10.1097/CCM.0000000000003879>.
18. Keinänen O., Takala J. Calculated versus measured oxygen consumption during and after cardiac surgery. Is it possible to estimate lung oxygen consumption? // *Acta Anaesthesiol Scand*. – 1997. – Vol. 41, № 7. – P. 803–809. <https://doi.org/10.1111/j.1399-6576.1997.tb04792.x>.
19. Khorsandi M., Dougherty S., Bouamra O. et al. Extra-corporeal membrane oxygenation for refractory cardiogenic shock after adult cardiac surgery: a systematic review and meta-analysis // *J Cardiothorac Surg*. – 2017. – Vol. 12, № 1. – P. 55. <https://doi.org/10.1186/s13019-017-0618-0>.
20. Kuan-Chih H., Lian-Yu L., Yih-Sharng C. et al. Three-dimensional echocardiography-derived right ventricular ejection fraction correlates with success of decannulation and prognosis in patients stabilized by venoarterial extracorporeal life support // *Journal of the American Society of Echocardiography*. – 2018. – Vol. 31, Is. 2. – P. 169–179. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2017.09.004>.
21. Li G., Zeng J., Liu Z. et al. The pulsatile modification improves hemodynamics and attenuates inflammatory responses in extracorporeal membrane oxygenation // *J Inflamm Res*. – 2021. – Vol. 14. – P. 1357–1364. <https://doi.org/10.2147/JIR.S292543>.
22. Mebazaa A., Combes A., van Diepen S. et al. Management of cardiogenic shock complicating myocardial infarction // *Intensive Care Med*. – 2018. – Vol. 44, № 6. – P. 760–773. <https://doi.org/10.1007/s00134-018-5214-9>.
23. Naidu S. S., Baran D. A., Jentzer J. C. et al. SCAI SHOCK Stage Classification Expert Consensus Update: A Review and Incorporation of Validation Studies: This statement was endorsed by the American College of Cardiology (ACC), American College of Emergency Physicians (ACEP), American Heart Association (AHA), European Society of Cardiology (ESC) Association for Acute Cardiovascular Care (ACVC), International Society for Heart and Lung Transplantation (ISHLT), Society of Critical Care Medicine (SCCM), and Society of Thoracic Surgeons (STS) in December 2021 // *J Am Coll Cardiol*. – 2022. – Vol. 79, № 9. – P. 933–946. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2022.01.018>. PMID: 35115207.
24. Nessler N., Gouin-Thibaut I., Parasido A. et al. Early endothelial injury in cardiogenic shock patients on venoarterial ECMO // *Intensive Care Med*. – 2024. – Vol. 50, № 11. – P. 1929–1930. <https://doi.org/10.1007/s00134-024-07642-x>.
25. Peris A., Lazzeri C., Cianchi G. et al. Clinical significance of echocardiography in patients supported by venous-venous extracorporeal membrane oxygenation // *J Artif Organs*. – 2015. – Vol. 18, № 2. – P. 99–105. <https://doi.org/10.1007/s10047-015-0824-2>.
26. Shea M. G., Balaji L., Grossestreuer A. V. et al. Oxygen metabolism after cardiac arrest: Patterns and associations with survival // *Resusc Plus*. – 2024. – Vol. 19. – P. 100667. <https://doi.org/10.1016/j.resplu.2024.100667>.
27. Sion-Sarid R., Cohen J., Houry Z. et al. Indirect calorimetry: a guide for optimizing nutritional support in the critically ill child // *Nutrition*. – 2013. – Vol. 29, № 9. – P. 1094–1099. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2013.03.013>.
28. Uber A., Grossestreuer A. V., Ross C. E. et al. Preliminary observations in systemic oxygen consumption during targeted temperature management after cardiac arrest // *Resuscitation*. – 2018. – Vol. 127. – P. 89–94. <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2018.04.001>.
29. Thiele H., Belohlavek J., Hassager C. Routine venoarterial extracorporeal membrane oxygenation for acute myocardial infarction-related cardiogenic shock: what we know and don't know // *Intensive Care Med*. – 2024. – Vol. 50. – P. 1354–1357. <https://doi.org/10.1007/s00134-024-07517-1>.
12. Hall E. J., Agarwal S., Cullum C. M. et al. Survivorship after cardiogenic shock. *Circulation*, 2025, vol. 151, no. 3, pp. 257–271. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.124.068203>.
13. Harjola V. P., Mebazaa A., Čelutkienė J. et al. Contemporary management of acute right ventricular failure: a statement from the Heart Failure Association and the Working Group on Pulmonary Circulation and Right Ventricular Function of the European Society of Cardiology. *Eur J Heart Fail*, 2016, vol. 18, no. 3, pp. 226–41. <https://doi.org/10.1002/ehf.478>.
14. Hoeyer-Nielsen A. K., Holmberg M. J., Grossestreuer A. V. et al. Association between the oxygen consumption: lactate ratio and survival in critically ill patients with sepsis. *Shock*, 2021, vol. 55, no. 6, pp. 775–781. <https://doi.org/10.1097/SHK.0000000000001661>.
15. Inadomi C., Terao Y., Yamashita K. et al. Comparison of oxygen consumption calculated by Fick's principle (using a central venous catheter) and measured by indirect calorimetry. *J Anesth*, 2008, vol. 22, no. 2, pp. 163–166. <https://doi.org/10.1007/s00540-007-0588-9>.
16. Keebler M. E., Haddad E. V., Choi C. W. Et al. Venoarterial extracorporeal membrane oxygenation in cardiogenic shock. *JACC Heart Fail*, 2018, vol. 6, no. 6, pp. 503–516. <https://doi.org/10.1016/j.jchf.2017.11.017>. PMID: 29655828.
17. Keller S. P. Management of peripheral venoarterial extracorporeal membrane oxygenation in cardiogenic shock. *Crit Care Med*, 2019, vol. 47, no. 9, pp. 1235–1242. <https://doi.org/10.1097/CCM.0000000000003879>.
18. Keinänen O., Takala J. Calculated versus measured oxygen consumption during and after cardiac surgery. Is it possible to estimate lung oxygen consumption? *Acta Anaesthesiol Scand*, 1997, vol. 41, no. 7, pp. 803–809. <https://doi.org/10.1111/j.1399-6576.1997.tb04792.x>.
19. Khorsandi M., Dougherty S., Bouamra O. et al. Extra-corporeal membrane oxygenation for refractory cardiogenic shock after adult cardiac surgery: a systematic review and meta-analysis. *J Cardiothorac Surg*, 2017, vol. 12, no. 1, pp. 55. <https://doi.org/10.1186/s13019-017-0618-0>.
20. Kuan-Chih H., Lian-Yu L., Yih-Sharng C. et al. Three-dimensional echocardiography-derived right ventricular ejection fraction correlates with success of decannulation and prognosis in patients stabilized by venoarterial extracorporeal life support. *Journal of the American Society of Echocardiography*, 2018, vol. 31, Is. 2, pp. 169–179. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2017.09.004>.
21. Li G., Zeng J., Liu Z. et al. The pulsatile modification improves hemodynamics and attenuates inflammatory responses in extracorporeal membrane oxygenation. *J Inflamm Res*, 2021, vol. 14, pp. 1357–1364. <https://doi.org/10.2147/JIR.S292543>.
22. Mebazaa A., Combes A., van Diepen S. et al. Management of cardiogenic shock complicating myocardial infarction. *Intensive Care Med*, 2018, vol. 44, no. 6, pp. 760–773. <https://doi.org/10.1007/s00134-018-5214-9>.
23. Naidu S. S., Baran D. A., Jentzer J. C. et al. SCAI SHOCK Stage Classification Expert Consensus Update: A Review and Incorporation of Validation Studies: This statement was endorsed by the American College of Cardiology (ACC), American College of Emergency Physicians (ACEP), American Heart Association (AHA), European Society of Cardiology (ESC) Association for Acute Cardiovascular Care (ACVC), International Society for Heart and Lung Transplantation (ISHLT), Society of Critical Care Medicine (SCCM), and Society of Thoracic Surgeons (STS) in December 2021. *J Am Coll Cardiol*, 2022, vol. 79, no. 9, pp. 933–946. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2022.01.018>. PMID: 35115207.
24. Nessler N., Gouin-Thibaut I., Parasido A. et al. Early endothelial injury in cardiogenic shock patients on venoarterial ECMO. *Intensive Care Med*, 2024, vol. 50, no. 11, pp. 1929–1930. <https://doi.org/10.1007/s00134-024-07642-x>.
25. Peris A., Lazzeri C., Cianchi G. et al. Clinical significance of echocardiography in patients supported by venous-venous extracorporeal membrane oxygenation. *J Artif Organs*, 2015, vol. 18, no. 2, pp. 99–105. <https://doi.org/10.1007/s10047-015-0824-2>.
26. Shea M. G., Balaji L., Grossestreuer A. V. et al. Oxygen metabolism after cardiac arrest: Patterns and associations with survival. *Resusc Plus*, 2024, vol. 19, pp. 100667. <https://doi.org/10.1016/j.resplu.2024.100667>.
27. Sion-Sarid R., Cohen J., Houry Z. et al. Indirect calorimetry: a guide for optimizing nutritional support in the critically ill child. *Nutrition*, 2013, vol. 29, no. 9, pp. 1094–1099. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2013.03.013>.
28. Uber A., Grossestreuer A. V., Ross C. E. et al. Preliminary observations in systemic oxygen consumption during targeted temperature management after cardiac arrest. *Resuscitation*, 2018, vol. 127, pp. 89–94. <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2018.04.001>.
29. Thiele H., Belohlavek J., Hassager C. Routine venoarterial extracorporeal membrane oxygenation for acute myocardial infarction-related cardiogenic shock: what we know and don't know. *Intensive Care Med*, 2024, vol. 50, pp. 1354–1357. <https://doi.org/10.1007/s00134-024-07517-1>.

30. Walsh T. S., Hopton P., Lee A. A comparison between the Fick method and indirect calorimetry for determining oxygen consumption in patients with fulminant hepatic failure // *Crit Care Med.* – 1998. – Vol. 26, № 7. – P. 1200–7. <https://doi.org/10.1097/00003246-199807000-00020>.
30. Walsh T. S., Hopton P., Lee A. A comparison between the Fick method and indirect calorimetry for determining oxygen consumption in patients with fulminant hepatic failure. *Crit Care Med*, 1998, vol. 26, no. 7, pp. 1200–7. <https://doi.org/10.1097/00003246-199807000-00020>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

ГНЦ ФГБУ «Российский научный центр хирургии им. акад. Б. В. Петровского» Минобрнауки России, 119435, Россия, Москва, Абрикосовский пер., д. 2

ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова» Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский университет), 119991, Россия, Москва, ул. Трубецкая, д. 8, стр. 2

Еременко Александр Анатольевич

д-р мед. наук, профессор, член-корреспондент РАН, зав. отделения реанимации и интенсивной терапии 2 (ОРИТ-2), Российский научный центр хирургии им. акад. Б. В. Петровского; профессор кафедры анестезиологии и реаниматологии, Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова. E-mail: aeremenko54@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5809-8563

Сорокина Любовь Сергеевна

канд. мед. наук, старший научный сотрудник, врач анестезиолог-реаниматолог отделения реанимации и интенсивной терапии 2 (ОРИТ-2), Российский научный центр хирургии им. акад. Б. В. Петровского. E-mail: soroka300@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5809-8563

Чарчян Эдуард Рафаэлович

д-р мед. наук, профессор, член-корреспондент РАН, зав. отделением реконструктивно-восстановительной сердечно-сосудистой хирургии, Российский научный центр хирургии им. акад. Б. В. Петровского. E-mail: charchmed@yahoo.com, ORCID: 0000-0002-0488-2560

Бабаев Максим Александрович

д-р мед. наук, главный научный сотрудник отделения реанимации и интенсивной терапии 2 (ОРИТ-2), Российский научный центр хирургии им. акад. Б. В. Петровского. E-mail: maxbabaev@mail.ru, ORCID: 0000-0002-4288-3791

Юдина София Сергеевна

младший научный сотрудник отделения реанимации и интенсивной терапии 2 (ОРИТ-2), Российский научный центр хирургии им. акад. Б. В. Петровского. E-mail: super.sonya25@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-4292-5306

Федулова Светлана Вячеславовна

канд. мед. наук, зав. отделением интраоперационной диагностики, Российский научный центр хирургии им. акад. Б. В. Петровского. E-mail: svfed76@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4517-9078

Кабанова Марина Николаевна

врач-кардиолог отделения реконструктивно-восстановительной сердечно-сосудистой хирургии, Российский научный центр хирургии им. акад. Б. В. Петровского. E-mail: dr.kabanova@mail.ru, ORCID: 0000-0001-8644-275

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Petrovsky National Research Center of Surgery, 2, Abrikosovsky per., Moscow, Russia, 119435

I. M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), 8, Trubetskaya str., Moscow, Russia, 119991

Eremenko Alexander A.

Dr. of Sci. (Med.), Professor, Corresponding Member of the RAS, Head of the Department of Resuscitation and Intensive Care 2, Petrovsky National Research Center of Surgery; Professor of the Department of Anesthesiology and Intensive Care, I. M. Sechenov First Moscow State Medical University. E-mail: aeremenko54@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5809-8563

Sorokina Lyubov S.

Cand. of Sci. (Med.), Senior Research Fellow, Anesthesiologist and Intensivist, Petrovsky National Research Center of Surgery. E-mail: soroka300@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5809-8563

Charchyan Edward R.

Dr. of Sci. (Med.), Professor, Corresponding Member of the RAS, Head of the Department of Reconstructive and Restorative Cardiovascular Surgery, Petrovsky National Research Center of Surgery. E-mail: charchmed@yahoo.com, ORCID: 0000-0002-0488-2560

Babaev Maxim A.

Dr. of Sci. (Med.), Chief Research Fellow, Petrovsky National Research Center of Surgery. E-mail: maxbabaev@mail.ru

Yudina Sofia S.

Junior Research Fellow, Petrovsky National Research Center of Surgery. E-mail: super.sonya25@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-4292-5306

Fedulova Svetlana V.

Cand. of Sci. (Med.), Head of the Department of Intraoperative Diagnostics, Petrovsky National Research Center of Surgery. E-mail: svfed76@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4517-9078

Kabanova Marina N.

Cardiologist at the Department of Reconstructive and Restorative Cardiovascular Surgery, Petrovsky National Research Center of Surgery. E-mail: dr.kabanova@mail.ru, ORCID: 0000-0001-8644-2755