Анестезиология и реаниматология
2025, №4, с. 6–12
https://doi.org/10.17116/anaesthesiology20250416

Russian Journal of Anesthesiology and Reanimatology
2025, No. 4, pp. 6–12
https://doi.org/10.17116/anaesthesiology20250416

Оценка реальной энергетической потребности у пациентов на экстракорпоральной мембранной оксигенации: сравнение модифицированного метода непрямой калориметрии с традиционными подходами

© Н.З. КАНШАОВ, И.Н. ЛЕЙДЕРМАН, А.О. МАРИЧЕВ

ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова» Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия

РЕЗЮМЕ

Пациенты, которым проводится экстракорпоральная мембранная оксигенация (ЭКМО), относятся к категории наиболее тяжелых в отделении реанимации и интенсивной терапии (ОРИТ), которым требуется комплексное лечение. Нутритивная поддержка (НП) является важным элементом медицины критических состояний. Непрямая калориметрия (НК) — «золотой стандарт» прикроватной оценки реальной энергетической потребности (РЭП) в ОРИТ. В связи с наличием двух «точек газообмена» необходимо проводить мониторинг потребления O_2 и выделения CO_2 как со стороны легких, так и со стороны мембранного оксигенатора, что существенно ограничивает возможности современных устройств для проведения НК. Нами разработан оригинальный метод модифицированной оценки РЭП пациента на фоне применения ЭКМО, позволяющий реализовать идею синхронного газового анализа.

Цель исследования. Выполнить сравнительный анализ показателей реальной энергопотребности, полученных модифицированным методом непрямой калориметрии, а также методом расчетных уравнений и на основании эмпирического подхода, у пациентов в процессе проведения вено-артериальной ЭКМО.

Материал и методы. Проведено одноцентровое проспективное открытое когортное исследование с включением 15 пациентов, которым проводили вено-артериальную ЭКМО. Оценку РЭП осуществляли модифицированным методом НК. Этот метод основан на одновременном измерении потребления кислорода (VO_2) и экскреции углекислого газа (VCO_2) со стороны легких (с помощью метаболографа) и оксигенатора (с использованием пневматического измерителя потока газа и портативного капнографа). На основе полученных показателей производили расчет РЭП по уравнению J.B. Weir. Величины РЭП сравнили с эмпирически определяемыми значениями энергопотребления в соответствии с клиническими рекомендациями Общероссийской общественной организации «Федерация анестезиологов и реаниматологов» (25 ккал на 1 кг массы тела в сутки) и с учетом уровня основного обмена по формуле Харриса—Бенедикта.

Результаты. Всего выполнено 15 измерений. Средний уровень реальных энергозатрат составил 2180 [1830—2446] ккал/сут, что в пересчете на 1 кг массы тела соответствует 29,2 [24,6—31,2] ккал на 1 кг массы тела в сутки. Эти значения существенно превышают как рекомендованное эмпирическое значение 25 ккал на 1 кг массы тела в сутки (p=0,046), так и уровень основного обмена по формуле Харриса—Бенедикта — 23,3 [20,5—25,0] ккал на 1 кг массы тела в сутки (p<0,001).

Заключение. Непрямая калориметрия может быть реализована у пациентов, которым проводится экстракорпоральная мембранная оксигенация, при наличии соответствующего оборудования. Энергопотребление у таких пациентов существенно превышает рекомендованные 25 ккал на 1 кг массы тела в сутки и расчетные значения основного обмена. Необходимо продолжить изучение влияния экстракорпоральной мембранной оксигенации на энергетический обмен у пациентов в критическом состоянии.

Ключевые слова: *экстракорпоральная мембранная оксигенация, метаболизм, энергопотребность, непрямая калориметрия, потребление кислорода, дыхательный коэффициент.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:
Каншаов Н.З. — https://orcid.org/0000-0002-1995-6171
Лейдерман И.Н. — https://orcid.org/0000-0001-8519-7145
Маричев А.О. — https://orcid.org/0000-0002-7753-118X
Автор, ответственный за переписку: Каншаов Н.З. — e-mail: nazir_07@inbox.ru

КАК ЦИТИРОВАТЬ:
Каншаов Н.З., Лейдерман И.Н., Маричев А.О. Оценка реальной энергетической потребности у пациентов на экстракорпоральной мембранной оксигенации: сравнение модифицированного метода непрямой калориметрии с традиционными подходами. *Анестезиология и реаниматология*. 2025;4:6–12. https://doi.org/10.17116/anaesthesiology20250416

Actual energy expenditure in patients on extracorporeal membrane oxygenation: a modified indirect calorimetry vs. traditional approaches

© N.Z. KANSHAOV, I.N. LEYDERMAN, A.O. MARICHEV

Almazov National Medical Research Centre, Saint-Petersburg, Russia

ABSTRACT
Patients on extracorporeal membrane oxygenation (ECMO) are the most severe in ICUs and require complex treatment. Nutritional support (NS) is a vital component of critical care. Indirect calorimetry (IC) is the gold standard for bedside assessment of actual energy expenditure (AEE) in the ICU. However, two "gas exchange points" require monitoring of oxygen consumption and carbon dioxide elimination from lungs and membrane oxygenator. This significantly limits the capabilities of modern IC devices. We developed an original method for estimation of AEE in ECMO patients enabling synchronous gas analysis.
Objective. To compare AEE values obtained using a modified indirect calorimetry, predictive equations and empirical approaches in patients on veno-arterial ECMO.
Material and methods. A single-center prospective open cohort study included 15 patients on veno-arterial ECMO. AEE was assessed using a modified IC method based on simultaneous measurement of oxygen consumption and carbon dioxide excretion from lungs (via metabolic monitor) and membrane oxygenator (via pneumatic flowmeter and portable capnograph). These data were used to calculate AEE using the J.B. Weir equation. AEE values were compared with empiric data on energy expenditure in accordance with the guidelines of the Federation of Anesthesiologists and Reanimatologists (25 kcal/kg/day) and basal metabolic rate (Harris-Benedict formula).
Results. There were 15 measurements. Mean AEE was 2180 [1830—2446] kcal/day (29.2 [24.6—31.2] kcal/kg/day). These values significantly exceeded the recommended empirical value (25 kcal/kg/day, p=0.046) and the calculated BMR according to the Harris-Benedict formula (23.3 [20.5—25] kcal/kg/day, p<0.001).
Conclusion. Indirect calorimetry is feasible in ECMO patients with appropriate equipment. Energy expenditure in these patients significantly exceeds the recommended 25 kcal/kg/day and the calculated basal metabolic rate. The effect of ECMO on energy metabolism in critically ill patients requires further research.

Keywords: *extracorporeal membrane oxygenation, metabolism, energy expenditure, indirect calorimetry, oxygen consumption, respiratory quotient.*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Kanshaov N.Z. — https://orcid.org/0000-0002-1995-6171
Leyderman I.N. — https://orcid.org/0000-0001-8519-7145
Marichev A.O. — https://orcid.org/0000-0002-7753-118X
Corresponding author: Kanshaov N.Z. — e-mail: nazir_07@inbox.ru

TO CITE THIS ARTICLE:
Kanshaov NZ, Leyderman IN, Marichev AO. Actual energy expenditure in patients on extracorporeal membrane oxygenation: a modified indirect calorimetry vs. traditional approaches. *Russian Journal of Anesthesiology and Reanimatology*. 2025;4:6–12. (In Russ.).
https://doi.org/10.17116/anaesthesiology20250416

Введение

Нутритивная поддержка (НП) является важным элементом интенсивной терапии пациентов в критическом состоянии. В условиях гиперметаболизма-гиперкатаболизма адекватная НП поддерживает мышечную массу и баланс необходимых макро- и микронутриентов в организме пациента [1, 2]. Напротив, нутритивная недостаточность (НН) приводит к увеличению продолжительности пребывания в отделении реанимации и интенсивной терапии (ОРИТ) и стационаре, повышает риск развития госпитальных инфекций, увеличивает сроки искусственной вентиляции легких (ИВЛ) и повышает вероятность неблагоприятного клинического исхода. Гипералиментация пациентов может приводить к развитию гипертермии, гипергликемии, гипертриглицеридемии, жировой инфильтрации печени, азотемии, гиперкапнии и гипервентиляции [3, 4]. Предотвращение энергетического дисбаланса крайне важно для пациентов в критическом состоянии, поскольку позволяет существенно снизить риск развития опасных последствий неадекватной НП. Часто используемые на практике различные прогностические уравнения не позволяют точно определить энергетические потребности наиболее тяжелых пациентов в критическом состоянии [5]. В настоящее время «золотым стандартом» для прикроватного измерения реальной энергетической потребности (РЭП) у пациентов ОРИТ является метод непрямой калориметрии (НК). Использование метода НК предложено в клинических рекомендациях Общероссийской общественной организации «Федерация анестезиологов и реаниматологов» (ФАР) [6], а также в руководствах Европейского общества клинического питания и метаболизма (ESPEN) и Американского общества парентерального и энтерального питания (ASPEN) [1, 2]. У пациентов в хроническом критическом состоянии, длительно пребывающих в стационаре, необходимо оценивать РЭП в динамике для контроля эффективности НП и предотвращения энергетического дисбаланса [4].

Пациенты с подключением экстракорпоральной мембранной оксигенации (ЭКМО) относятся к категории наиболее тяжелых в ОРИТ, им требуется комплексная интенсивная терапия, ассоциированная с длительным пребыванием в стационаре и долгосрочной реабилитацией. При этом отмечен высокий уровень неблагоприятных клинических исходов [7]. Использование экстракорпорального контура с оксигенатором и, соответственно, наличие второй точки газообмена помимо легких существенно ограничивает точность и возможность проведения НК [8]. Для расчета РЭП у данной когорты пациентов требуется анализ газообмена как со стороны легких, так и со стороны мембранного оксигенатора [9, 10].

Учитывая стремительный рост применения ЭКМО в медицине критических состояний [11—13], актуальным является поиск новых методов оценки реальной энергопотребности, позволяющих преодолеть описанные выше проблемы.

Цель исследования — выполнить сравнительный анализ показателей реальной энергопотребности, полученных модифицированным методом непрямой калориметрии,

а также методом расчетных уравнений и на основании эмпирического подхода, у пациентов в процессе проведения вено-артериальной ЭКМО.

Материал и методы

Проведено одноцентровое проспективное открытое когортное исследование с включением 15 пациентов, которым проводилась вено-артериальная ЭКМО в отделении анестезиологии и реанимации кардиохирургического профиля ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России (Санкт-Петербург, Россия) в период 2023—2024 гг. Исследование одобрено этическим комитетом ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России (выписка №0710-22 из протокола заседания ЛЭК №10-22 от 3 октября 2022 г.).

Критерии включения в исследование: проведение вено-артериальной ЭКМО более 48 ч; возраст от 18 до 70 лет.

Критерии невключения: острые инфекционные заболевания верхних или нижних дыхательных путей; кровотечения из верхних или нижних дыхательных путей; сепсис.

Критерии исключения: тромбоэмболия легочной артерии; пневмоторакс; гемоторакс; острое желудочно-кишечное кровотечение; острое нарушение мозгового кровообращения.

На первом этапе исследования проведена оценка РЭП пациентов методом непрямой калориметрии с 3-х по 20-е сутки после имплантации системы вено-артериальной ЭКМО. Разработанный нами модифицированный метод непрямой калориметрии для ЭКМО (заявление о выдаче патента на изобретение от 11.11.2024, регистрационный номер 2014133670) основан на одновременном измерении потребления кислорода (VO_2) и экскреции углекислого газа (VCO_2) как со стороны легких пациента, так и со стороны оксигенатора. Измерения со стороны легких проводили с помощью автономного метаболографа Q-NRG+ (COSMED S.R.L., Италия). Для обеспечения более стабильных показателей мониторинга аппарат измеряет объемное содержание кислорода и углекислого газа каждые 30 с из камеры смешивания, куда происходит забор проб газа из контура ИВЛ каждый дыхательный цикл. Оценку потока газа на ЭКМО и измерение объемного содержания кислорода проводили измерителем пневматическим (пневмотестером) АР1 (АО «Красногвардеец», Россия), а капнометрию — портативным капнографом (Respironics Novametrix, Inc., США). Определение объемного потока газа в пневмотестере происходит при прохождении газа через специальный канал. Метод основан на изменении перепада давления в газе при прохождении сквозь сплетенную из тонкой стальной проволоки сетку с мелкой ячейкой, соответственно, не происходит утечки, как при заборе пробы газа для анализа в аппаратах с методикой «бокового потока». В этом канале измеряется концентрация кислорода с помощью гальванического датчика кислорода. На входе в измерительный канал подключается дыхательный бактериальный фильтр с гидрофобными свойствами для исключения попадания загрязнений и влаги на датчики потока и кислорода. На выходе из измерительного канала подсоединялся портативный инфракрасный капнограф для регистрации объемного содержания углекислого газа в газовой смеси. За 1 ч до исследования не проводили никаких активных процедур, не изменяли положение тела в постели, не меняли параметры ИВЛ, если пациент находился на ИВЛ. Пациентам на самостоятельном дыхании измерения проводили спустя 2 ч после приема пищи. Общая схема подключения оборудования представлена на **рис. 1**.

Объемная скорость и концентрация кислорода в газовоздушной смеси, которая подается в оксигенатор, настраивается с помощью газового смесителя, исходя из клинической ситуации. Для более точной оценки состава газовой смеси из смесителя предварительно проводили измерение объемной скорости потока и концентрации кислорода с помощью пневмотестера. Содержание углекислого газа принимали за 0%. Для этого пневмотестер встраивался в контур подачи газа, как показано на **рис. 2**.

Далее одновременно производили измерение газового состава на вдохе и выдохе с помощью метаболографа, а из мембранного оксигенатора — пневмотестером и пор-

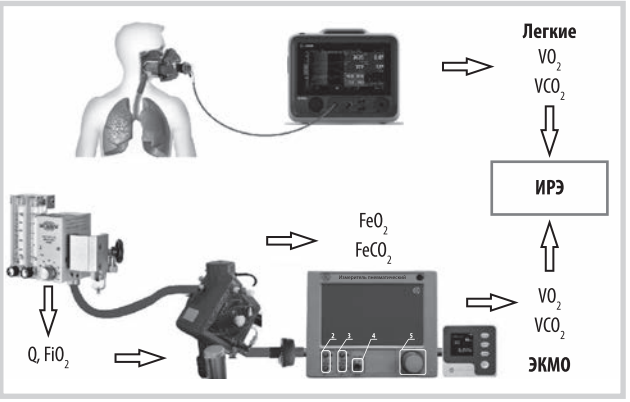

***Рис. 1.* Общая схема подключения газоанализаторов для проведения непрямой калориметрии у пациентов, которым проводится экстракорпоральная мембранная оксигенация.**

ЭКМО — экстракорпоральная мембранная оксигенация; Q — поток газовой смеси через оксигенатор; FiO_2 — фракция кислорода в подаваемой газовой смеси; FeO_2 — фракция кислорода в газовой смеси, выходящей из оксигенатора; $FeCO_2$ — фракция углекислого газа в газовой смеси, выходящей из оксигенатора; VO_2 — потребление кислорода; VCO_2 — выделение углекислого газа; ИРЭ — истинный расход энергии.

***Fig. 1.* Scheme of gas analyzer connection for indirect calorimetry in ECMO patients.**



***Рис. 2.* Пневмотестер — измеритель пневматический, встроенный в контур подачи газовой смеси в оксигенатор.**

***Fig. 2.* Pneumatic meter inserted into the circuit of gas mixture supply to the oxygenator.**

тативным капнографом, которые последовательно подключали к выходу из оксигенатора через трубку из поливинилхлорида размером 3/8". Измерения производили до получения значений показателей с вариабельностью менее 5% в течение 10 мин. В результате проанализированы средние величины VO_2 (мл/мин) и VCO_2 (мл/мин) со стороны легких, объемная скорость потока (Q, л/мин), концентрация кислорода в газовой смеси на входе в оксигенатор (FiO_2, %), концентрация кислорода на выходе из оксигенатора (FeO_2, %), концентрация углекислого газа на выходе из оксигенатора ($FeCO_2$, %) — со стороны оксигенатора. Используя полученные данные, производили расчеты по следующим формулам:

$$VO_2\,(ЭКМО)=Q\cdot(FiO_2-FeO_2) \quad (1)$$

$$VCO_2\,(ЭКМО)=Q\cdot FeCO_2 \quad (2)$$

$$VO_2\,(общ.)=VO_2\,(ЭКМО)+VO_2\,(легкие) \quad (3)$$

$$VCO_2\,(общ.)=VCO_2\,(ЭКМО)+VCO_2\,(легкие) \quad (4)$$

$$РЭП\,(ккал/сут)=(3{,}94\cdot VO_2\,общ.)+(1{,}11\cdot VCO_2\,общ.)\cdot 1{,}44 \quad (5)$$

На втором этапе исследования провели сравнение значений РЭП, определенных методом непрямой калориметрии, с показателями энергопотребления, рассчитанными по уравнению Харриса—Бенедикта [14] и эмпирически в соответствии с российскими и европейскими клиническими рекомендациями (25 ккал на 1 кг массы тела в сутки) [2, 6]. Сравнительный анализ проводили как в отношении абсолютных значений энергопотребления, так и в пересчете на 1 кг массы тела пациента.

Всем пациентам, включенным в исследование, проводили НП в рамках клинических рекомендаций ФАР. Целевые параметры энергетического и белкового обеспечения были установлены на уровне 25 ккал на 1 кг массы тела в сутки и 1,2 г на 1 кг массы тела в сутки соответственно. Выбор метода (пероральный, энтеральный, парентеральный) НП производили, исходя из особенностей клинической ситуации.

Статистический анализ результатов исследования проводили с использованием лицензионной программы Statistica 10.0. Количественные переменные приведены в виде среднего значения (*M*), стандартного отклонения (*SD*), медианы (Me) и границ межквартильного интервала (Q_1—Q_3). Для качественных признаков приведены количество и доля в процентах. Полученные показатели РЭП сравнивали с расчетными и эмпирическими данными с использованием *t*-критерия Уилкоксона. Для всех статистических критериев ошибку первого рода устанавливали равной 0,05. Нулевую гипотезу (отсутствие различий) отвергали, если вероятность (*p*) не превышала ошибку первого рода.

Результаты

Основная характеристика пациентов, включенных в исследование, представлена в **табл. 1**.

Показатель VO_2 (ЭКМО) составил 89,5 [75—128,5] мл/мин, VO_2 (легкие) — 212 [138—234] мл/мин, VCO_2 (ЭКМО) — 70,2 [44,4—97,8] мл/мин, VCO_2 (легкие) — 188 [141—243] мл/мин. Среднее значение измеренной РЭП составило 2129±340 ккал/сут, дыхательный коэффициент (RQ) варьировал от 0,7 до 1,1. Результаты непрямой калориметрии представлены в **табл. 2**.

Полученные значения RQ свидетельствуют о смешанном типе потребления углеводов и липидов с небольшим преобладанием окисления углеводов. Несмотря на то что пациенты с имплантированными системами ЭКМО вынужденно иммобилизированы, значения VO_2 у данной категории пациентов в среднем на 0,5 мл на 1 кг массы тела в минуту выше одного метаболического эквивалента (p=0,053). Реальная энергетическая потребность, рассчитанная на 1 кг массы тела, составила 29,2 ккал на 1 кг массы тела в сутки.

Показатель основного обмена по уравнению Харриса—Бенедикта составил 1659 [1552—1800] ккал/сут, или 23,3 [20,5—25] ккал на 1 кг массы тела в сутки. Сравнение РЭП с эмпирическими значениями энергопотребности и величиной основного обмена по формуле Харриса—Бенедикта представлено на **рис. 3**.

Таким образом, измеренные значения РЭП были статистически значимо выше рекомендованных 25 ккал на 1 кг массы тела в сутки и величины основного обмена, определенного по формуле Харриса—Бенедикта.

Таблица 1. **Основная характеристика пациентов**

Table 1. **Data of patients**

Параметр	Пациенты (n=15)
Возраст, годы	41 [33—56]
Пол, мужчины/женщины	12 (80%)/3
Рост, см	178 [170—180]
Масса тела, кг	72 [66—81]
ИМТ, кг/м^2	24,1 [19,7—27,4]
ИВЛ, *n*	5
Седация/миорелаксанты, *n*	2/0
Показания к ЭКМО, *n*	
острая декомпенсация ХСН	10
посткардиотомная сердечная недостаточность	4
экстракорпоральная СЛР	1

Примечание. Данные представлены в виде Me [Q_1—Q_3]. ИМТ — индекс массы тела; ИВЛ — искусственная вентиляция легких; ЭКМО — экстракорпоральная мембранная оксигенация; ХСН — хроническая сердечная недостаточность; СЛР — сердечно-легочная реанимация.

Таблица 2. **Параметры, полученные при проведении непрямой калориметрии**

Table 2. **Indirect calorimetry data**

Параметр	Значение, Me [Q_1—Q_3]
VO_2, мл/мин	302 [257—336]
VCO_2, мл/мин	268 [231—291]
VO_2/кг, мл/кг/мин	3,94 [3,48—4,5]
VCO_2/кг, мл/кг/мин	3,55 [3,18—4,15]
РЭП, ккал/сут	2180 [1830—2446]
РЭП/кг, ккал на 1 кг массы тела в сутки	29,2 [24,6—31,2]
Дыхательный коэффициент	0,88 [0,79—1,0]

Примечание. VO_2 — потребление кислорода; VCO_2— экскреция углекислого газа; РЭП — реальная энергетическая потребность.

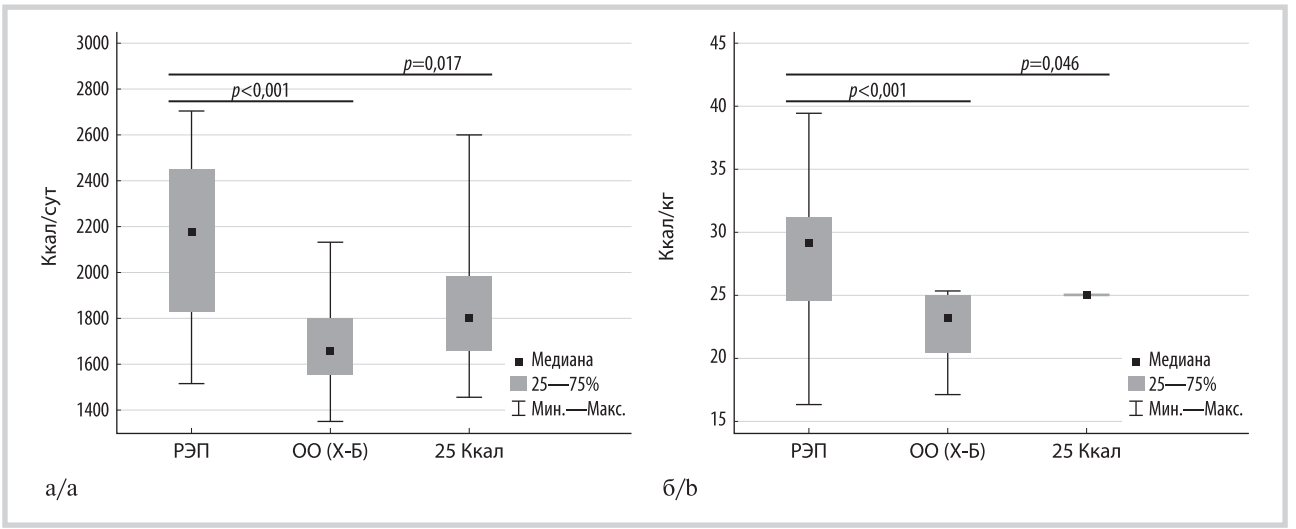

Рис. 3. **Сравнение абсолютных значений реальной энергетической потребности с эмпирическими и расчетными показателями энергопотребности.**

а — показатели энергопотребности рассчитаны на фактическую массу тела пациента; б — показатели энергопотребности рассчитаны на 1 кг массы тела. Данные представлены в виде диаграммы «ящик с усами». РЭП — реальная энергетическая потребность; ОО (Х-Б) — основной обмен по формуле Харриса—Бенедикта; 25 ккал — рекомендованное эмпирическое значение энергопотребления.

Fig. 3. **Absolute, empirical and estimated AEE values.**

a — AEE per a body weight; b — AEE per a kg of body weight. The data are presented as a box-and-whisker diagram.

Обсуждение

До недавнего времени НК не использовалась у пациентов, подключенных к ЭКМО, из-за газообмена, происходящего на мембранном оксигенаторе, который невозможно учитывать с помощью традиционно проводимой методики НК [8].

На сегодняшний день предложенные методики применения НК у пациентов на фоне ЭКМО основаны на последовательном газоанализе со стороны как «естественного» легкого, так и мембранного оксигенатора с дальнейшим расчетом РЭП с помощью модифицированного уравнения J.B. Weir [11] по суммированным значениям потребления кислорода (VO_2) и экскреции углекислого газа (VCO_2) [9, 10]. Так, E. De Waele и соавт. расчет VO_2 и VCO_2 со стороны оксигенатора [9] производили с помощью метаболографа, а T. Wollersheim и соавт. — с использованием анализа газового состава крови «до и после» оксигенатора с помощью достаточно сложных математических формул [10]. В то же время рядом экспертов отмечены проблемы при использовании НК в процессе ЭКМО: последовательный, а не одномоментный отбор проб со стороны легких и оксигенатора; преобразование Haldane, используемое в метаболографах, при FiO_2 >70% вносит ошибки в измерение VO_2; датчики потока в метаболографах предназначены для линий потока вдоха и выдоха и не подходят для измерения в условиях постоянного стационарного газотока, как в случае с ЭКМО; технология газоанализа в боковом потоке, реализованная в большинстве метаболографов, может существенно влиять на результаты исследования при низком потоке свежего газа на ЭКМО; для расчета VO_2 и VCO_2 с помощью анализа газов крови производятся заборы проб из экстракорпорального контура с высоким давлением (до 350 мм рт.ст.), соответственно, повышается риск кровотечений, эмболических и инфекционных осложнений; наличие конденсата в пробоотборных линиях также искажает результаты исследования и делает невозможным длительное непрерывное измерение [12, 13].

Первый опыт оценки РЭП у пациента с дыхательной недостаточностью, которому проводили вено-венозную ЭКМО, описан E. De Waele и соавт. в 2015 г. [15]. Авторы сначала подключали метаболограф к контуру аппарата ИВЛ. После регистрации значений VO_2 и VCO_2 со стороны легких метаболограф переключали через специальный коннектор на мембранный оксигенатор, далее также по данным потока газа фракции кислорода и углекислого газа рассчитывали VO_2 и VCO_2 со стороны ЭКМО. Используя полученные данные с помощью уравнения J.B. Weir, производили расчет РЭП. Применяя подобную модификацию НК, авторы в дальнейшем проанализировали данные 7 пациентов, подключенных к вено-венозной (n=3) и вено-артериальной (n=4) ЭКМО, и получили вариабельные значения РЭП (от 12 до 33 ккал на 1 кг массы тела в сутки) [9]. Малый размер выборки наряду с клинической разнородностью включенных в исследование пациентов не позволили охарактеризовать их метаболический статус. Другой подход к проведению НК предложен T. Wollersheim и соавт. [10]: использование традиционной НК с помощью метаболографа со стороны легких и расчет VO_2 и VCO_2 со стороны оксигенатора на основе анализов газового состава крови из экстракорпорального контура (вычисление различия содержания кислорода и углекислоты в крови до и после оксигенатора) и объемной скорости перфузии. Авторы включили в исследование только пациентов с острым респираторным дистресс-синдромом (ОРДС), которым проводилась вено-венозная ЭКМО. У 20 пациентов РЭП составила в среднем 2013 [1786/2332] ккал/сут при массе тела 78 [70—107] кг. При сравнении с группой контроля (ОРДС без ЭКМО) статистически значимого различия по показателю энергопотребности не было. Аналогичное исследование провели O.A. Tatucu-Babet и соавт., но с оценкой энергообмена пациентов на вено-артериальной ЭКМО [16]. В 1-е сутки после имплантации ЭКМО РЭП составила 22 [15 —24] ккал на 1 кг массы тела в сутки (n=14), на 5-е сутки — 25 [21—26] ккал на 1 кг массы тела в сутки (n=7). При сравнении с группой контроля также

не было статистически значимого различия по показателю энергопотребности.

Несмотря на достижение значительного прогресса в проведении НК у пациентов на экстракорпоральном жизнеобеспечении, по мнению ряда экспертов, остается немало нерешенных технических вопросов и препятствий, связанных с ЭКМО [12, 13]. Предложенная нами схема проведения НК существенно нивелирует эти ограничения. Использование пневмотестера и портативного капнографа синхронно с метаболографом позволяет уменьшить погрешность получаемых данных при изменении соотношения объемной скорости кровотока в малом круге кровообращения и через аппарат ЭКМО, которое не может быть зарегистрировано при последовательном измерении. Пневмотестер проводит измерение по технологии прямого потока, соответственно, не происходит утечки части газовой смеси, что особенно важно при низком потоке газовой смеси. Принцип работы пневмотестера не подразумевает зависимости от фаз дыхательного цикла и подходит для регистрации стационарного потока газа с возможностью определения концентрации кислорода в диапазоне от 0 до 100%.

Полученные нами результаты реального энергопотребления (29,2 [24,6—31,2] ккал на 1 кг массы тела в сутки) несколько выше, чем данные, встречающиеся в литературе. Причины могут быть связаны с тем, что в выборке только 2 пациента получали седацию и 5 пациентов находились на ИВЛ, никто не получал миорелаксанты на момент исследования. Соответственно, пациенты в сознании и на самостоятельном дыхании потребляли больше кислорода в связи с большей работой дыхания и более высокой мобильностью. При этом у 2 пациентов, получавших пропофол с целью седации, РЭП составила 21,1 и 16,1 ккал на 1 кг массы тела в сутки. В последнем случае пациент был с ожирением III степени (индекс массы тела 41 кг/м^2), что также могло послужить причиной низкого значения энергопотребления при экстраполяции на 1 кг массы тела.

При расчете потребности в энергии по формуле Харриса—Бенедикта необходимо учитывать, что по ней оценивается только показатель основного обмена. Но при стрессовых ситуациях, в частности при повреждениях, уровень метаболизма возрастает. Следует учесть двигательную активность, фактор гипертермии и повреждения [14]. Коэффициенты метаболической активности для факторов активности и температуры известны и описаны в литературе, но нет достоверных данных о влиянии экстракорпорального кровообращения на уровень энергопотребления.

Ограничениями данного исследования являются малый размер выборки, что не позволяет сравнить субпопуляции пациентов, и влияние на уровень энергетического обмена таких параметров, как ожирение или дефицит массы тела, особенности ИВЛ, седации, центральный или периферический доступ подключения контура ЭКМО. Кроме того, измерения выполнены однократно в разные сроки критического состояния (с 3-и по 20-е сутки), что не дает возможности оценить в динамике РЭП в ранние и поздние сроки интенсивной терапии.

Заключение

Проведение непрямой калориметрии возможно у пациентов, которым проводится экстракорпоральная мембранная оксигенация, при наличии соответствующего оборудования. Реальное потребление энергии у таких пациентов превышает рекомендованные 25 ккал на 1 кг массы тела в сутки и уровень основного обмена, рассчитанный по формуле Харриса—Бенедикта. Выраженные индивидуальные различия параметров энергетического обмена пациентов в критическом состоянии и самостоятельное влияние экстракорпоральной мембранной оксигенации на течение синдрома гиперметаболизма-гиперкатаболизма означают необходимость организации и проведения дальнейших исследований в этой области.

Участие авторов:
Концепция и дизайн исследования — Каншаов Н.З., Лейдерман И.Н., Маричев А.О.
Сбор и обработка материала — Каншаов Н.З.
Статистический анализ данных — Каншаов Н.З.
Написание текста — Каншаов Н.З.
Редактирование — Лейдерман И.Н.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interest.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. McClave SA, Taylor BE, Martindale RG, Warren MM, Johnson DR, Braunschweig C, McCarthy MS, Davanos E, Rice TW, Cresci GA, Gervasio JM, Sacks GS, Roberts PR, Compher C, the Society of Critical Care Medicine, the American Society for Parenteral and Enteral Nutrition. Guidelines for the provision and assessment of nutrition support therapy in the adult critically ill patient: society of critical care medicine (Sccm) and american society for parenteral and enteral nutrition(A. S. P. E. N.). *Journal of Parenteral and Enteral Nutrition*. 2016;40(2):159-211. https://doi.org/10.1177/0148607115621863
2. Singer P, Blaser AR, Berger MM, Alhazzani W, Calder PC, Casaer MP, Hiesmayr M, Mayer K, Montejo JC, Pichard C, Preiser JC, Van Zanten ARH, Oczkowski S, Szczeklik W, Bischoff SC. ESPEN guideline on clinical nutrition in the intensive care unit. *Clinical Nutrition*. 2019;38(1):48-79. https://doi.org/10.1016/j.clnu.2018.08.037
3. Bendavid I, Singer P, Theilla M, Themessl-Huber M, Sulz I, Mouhieddine M, Schuh C, Mora B, Hiesmayr M. NutritionDay ICU: A 7 year worldwide prevalence study of nutrition practice in intensive care. *Clinical Nutrition*. 2017;36(4):1122-1129. https://doi.org/10.1016/j.clnu.2016.07.012
4. Tatucu-Babet OA, Ridley EJ, Tierney AC. Prevalence of underprescription or overprescription of energy needs in critically ill mechanically ventilated adults as determined by indirect calorimetry: a systematic literature review. *Journal of Parenteral and Enteral Nutrition*. 2016;40(2):212-225. https://doi.org/10.1177/0148607114567898
5. Zusman O, Kagan I, Bendavid I, Theilla M, Cohen J, Singer P. Predictive equations versus measured energy expenditure by indirect calorimetry: A retrospective validation. *Clinical Nutrition*. 2019;38(3):1206-1210. https://doi.org/10.1016/j.clnu.2018.04.020
6. Лейдерман И.Н., Грицан А.И., Заболотских И.Б., Лебединский К.М., Крылов К.Ю., Мазурок В.А., Ярошецкий А.И. Метаболический мониторинг и нутритивная поддержка при проведении длительной искусственной вентиляции легких. *Анестезиология и реаниматология*. 2022;(5):6-17.
Leiderman IN, Gritsan AI, Zabolotskikh IB, Lebedinskii KM, Krylov KYu, Mazurok VA, Yaroshetskiy AI. Metabolic monitoring and nutritional support following long-term mechanical ventilation. *Russian Journal of Anesthesiology and Reanimatology*. 2022;(5):6-17. (In Russ.). https://doi.org/10.17116/anaesthesiology20220516

7. Combes A, Brodie D, Chen YS, Fan E, Henriques JPS, Hodgson C, Lepper PM, Leprince P, Maekawa K, Muller T, Nuding S, Ouweneel DM, Roch A, Schmidt M, Takayama H, Vuylsteke A, Werdan K, Papazian L. The ICM research agenda on extracorporeal life support. *Intensive Care Medicine*. 2017;43(9):1306-1318. https://doi.org/10.1007/s00134-017-4803-3

8. Kagan I, Singer P. Nutritional imbalances during extracorporeal life support. In: Singer P, ed. *World Review of Nutrition and Dietetics*. Vol 105. S. Karger AG; 2013:154-159. https://doi.org/10.1159/000341292

9. De Waele E, Jonckheer J, Pen JJ, Demol J, Staessens K, Puis L, La Meir M, Honoré PM, L. N. G. Malbrain M, Spapen HD. Energy expenditure of patients on ECMO: A prospective pilot study. *Acta Anaesthesiologica Scandinavica*. 2019;63(3):360-364. https://doi.org/10.1111/aas.13287

10. Wollersheim T, Frank S, Müller MC, Skrypnikov V, Carbon NM, Pickerodt PA, Spies C, Mai K, Spranger J, Weber-Carstens S. Measuring Energy Expenditure in extracorporeal lung support Patients (Meep) — Protocol, feasibility and pilot trial. *Clinical Nutrition*. 2018;37(1):301-307. https://doi.org/10.1016/j.clnu.2017.01.001

11. Weir JBDV. New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *The Journal of Physiology*. 1949;109(1-2):1-9. https://doi.org/10.1113/jphysiol.1949.sp004363

12. Priem S, Jonckheer J, De Waele E, Stiens J. Indirect calorimetry in spontaneously breathing, mechanically ventilated and extracorporeally oxygenated patients: an engineering review. *Sensors*. 2023;23(8):4143. https://doi.org/10.3390/s23084143

13. Singer P, Statlender L. Beyond the limits of indirect calorimetry. *European Journal of Clinical Nutrition*. 2023;77(9):925-926. https://doi.org/10.1038/s41430-023-01319-2

14. *Парентеральное и энтеральное питание. Национальное руководство*. Под ред. Петрикова С.С., Хубутии М.Ш., Поповой Т.С. М.: М.: ГЭОТАР-Медиа; 2023:247-253. *Parenteral'noe i enteral'noe pitanie. Natsional'noe rukovodstvo.* Petrikov SS, Khubutiya MSh, Popova TS, eds. M.: M.: GEOTAR-Media; 2023:247-253. (In Russ.).

15. De Waele E, Van Zwam K, Mattens S, Staessens K, Diltoer M, Honoré PM, Czapla J, Nijs J, La Meir M, Huyghens L, Spapen H. Measuring resting energy expenditure during extracorporeal membrane oxygenation: preliminary clinical experience with a proposed theoretical model. *Acta Anaesthesiologica Scandinavica*.. 2015;59(10):1296-1302. https://doi.org/10.1111/aas.12564

16. Tatucu-Babet OA, Diehl A, Kratzing C, Lambell K, Burrell A, Tierney A, Nyulasi I, Bailey M, Sheldrake J, Ridley EJ. Modified indirect calorimetry for patients on venoarterial extracorporeal membrane oxygenation: a pilot feasibility study. *European Journal of Clinical Nutrition*. 2023;77(9):888-894. https://doi.org/10.1038/s41430-023-01291-x

Поступила/Received 02.01.2025
Принята к печати/Accepted 26.02.2025