

DOI: 10.26693/jmbs05.04.182

УДК [612.13:616-005]-072

*Михневич К. Г., Волкова Ю. В.,  
Баранова Н. В., Бойко Е. В.*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕФЕРЕНТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КРОВООБРАЩЕНИЯ

Харьковский национальный медицинский университет,  
Украина

kmikhnevich@yahoo.com

Снабжение тканей энергией, необходимой для поддержания жизнедеятельности, осуществляется путём транспорта носителя потенциальной химической энергии – кислорода – из атмосферы. В этом процессе участвует система кровообращения, для работы которой также нужна энергия и, следовательно, кислород, то есть энергоснабжение организма имеет энергетическую цену. Главным кинетическим показателем системы кровообращения является сердечный выброс, одинаковый уровень которого может быть обеспечен при разных энергозатратах (при разной кислородной цене). Таким образом, учёт энергетики кровообращения необходим для полной оценки состояния системы кровообращения при разных вариантах её недостаточности, но для этого прежде всего необходимо определить референтные пределы колебаний энергетических параметров кровообращения, что и явилось целью данного исследования.

Для исследования энергетики кровообращения нами разработан ряд показателей, для расчёта которых необходимо определение механических (кинетических и динамических) параметров кровообращения и учёт гемического звена транспорта кислорода. К измеряемым кинетическим показателям отнесены ударный объём, фракция выброса, частота сердечных сокращений, сердечный выброс и соответствующие им индексы (ударный и сердечный). Динамическими показателями являются системное перфузионное давление и общее периферическое сосудистое сопротивление с его индексом – удельным периферическим сосудистым сопротивлением. По общепринятым гемическим показателям рассчитывали содержание кислорода в крови, его транспорт и потребление.

На основании этих показателей были определены референтные пределы колебаний энергетических параметров кровообращения: мощности

кровотока, потребляемой тканями мощности, давление транспорта и потребления кислорода, кислородный резерв и циркуляторный резерв. Мощность кровотока, потребляемая тканями мощность и циркуляторный резерв нормировали к площади поверхности тела с получением соответствующих индексов (ИМКТ, ИПТМ, ИЦР).

У здоровых лиц, находящихся в состоянии покоя, энергетические показатели кровообращения определялись механическими параметрами, в то время, как энергетический бюджет тканей от них практически не зависел, что мы объясняем отсутствием напряжённости компенсации.

**Ключевые слова:** энергетика кровообращения, транспорт кислорода, мощность кровотока.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Представленная публикация является фрагментом НИР «Анестезиологическое обеспечение и интенсивная терапия у пациентов с поражением звеньев системы транспорта кислорода», № гос. регистрации 0120U102018.

**Введение.** Проблемы энергообмена организма с внешней средой до настоящего времени не разрешены, а их разработка нередко приводит к возникновению новых и неожиданных вопросов [1, 2]. Решение этих вопросов, на наш взгляд, невозможно без анализа механизмов поступления энергии в организм. Давно выяснено, что у высших организмов главным способом получения энергии является аэробное окисление, невозможное без работы системы транспорта кислорода из атмосферы в ткани. Важнейшим звеном этой системы является система кровообращения (СК), энергетика которой остаётся до сих пор практически неисследованной.

Главной функцией СК является снабжение тканей носителем потенциальной химической энергии (ПХЭ) – кислородом. Основой адекватного

отправления этой функции является соответствие интегрального кинетического показателя работы СК – сердечного выброса (СВ) – энергетическим потребностям тканей. Таким образом, СВ является конечным ауторегулируемым параметром кровообращения, что давно является установленным фактом [3]. Инструментами ауторегулирования СВ являются изменения силы сокращений миокарда, обеспечивающей определённое давление крови, и сохранение соответствия объёма циркулирующей крови (ОЦК) объёму сосудов посредством изменения радиуса сосудов, что влияет на общее периферическое сосудистое сопротивление (ОПСС), обратно пропорциональное четвёртой степени радиуса сосуда. Соответствие ОЦК объёму сосудов означает не просто равенство этих объёмов, которое в силу замкнутости СК имеет место всегда, а сохранение круглой формы сечения сосуда с помощью вазоконстрикции. Таким образом, СВ, соответствующий энергетическим потребностям тканей, может быть обеспечен при разных уровнях давления крови и ОПСС (эти показатели являются динамическими), а это неизбежно означает разные энергетические затраты миокарда на обеспечение одного и того же СВ в разных условиях. Другими словами, энергоснабжение тканей имеет определённую энергетическую цену, и её величина является одной из важнейших характеристик кровообращения [4].

Данное положение доказывалось давно проведёнными экспериментами, в ходе которых показано, как меняются энергозатраты миокарда при разном системном перфузионном давлении (СПД), являющимся разницей между эффективным артериальным давлением (АДэ, или среднее артериальное давление) и центральным венозным давлением (ЦВД), и разном ОПСС. Поддержание постоянного СВ при росте ОПСС увеличивает затраты энергии миокардом при его постоянном коэффициенте полезного действия (КПД). Поддержание же постоянного СПД при падении ОПСС ведёт к росту СВ и затрат энергии миокардом, но КПД миокарда при этом растёт [1]. Объяснения результатов этих экспериментов в литературе найти нам не удалось, но энергетический подход к оценке СК легко решает эту задачу.

**Целью** данного исследования явилось исследование энергетики кровообращения у здоровых лиц и определение референтных пределов колебаний энергетических показателей системы кровообращения.

**Материал и методы исследования.** Исследованы параметры кровообращения у 30 здоровых добровольцев (сотрудников и интернов кафедры медицины неотложных состояний, анестезиологии

и интенсивной терапии ХНМУ). Исследование проведено на базе КНП «Харьковская городская клиническая больница скорой и неотложной помощи им. проф. А. И. Мещанинова» Харьковского городского совета.

Проведённые исследования полностью соответствуют законодательству Украины и отвечают принципам Хельсинкской декларации прав человека, Конвенции Союза Европы относительно прав человека и биомедицины (подтверждено заключением комиссии по биоэтике, протокол №3, 2006 г). Со всеми участниками исследования было подписано "Информированное согласие" на проведение исследования, и приняты все меры для обеспечения их анонимности.

Для исследования энергетики кровообращения нами разработан ряд показателей. Для этого механические параметры кровотока были разделены на кинетические и динамические. К первым отнесли ударный объём (УО), фракцию выброса (ФВ), частоту сердечных сокращений (ЧСС), сердечный выброс (СВ) и соответствующие им индексы – ударный (УИ) и сердечный (СИ), ко вторым – системное перфузионное давление (СПД) как разность между эффективным (средним) АД и центральным венозным давлением (ЦВД) и общее периферическое сопротивление (ОПСС) с его индексом – удельным периферическим сосудистым сопротивлением (УПСС). Индексы рассчитывались путём нормирования показателей к площади поверхности тела.

Для определения энергетических показателей кровообращения необходимы параметры гемического звена системы транспорта кислорода – содержание кислорода в артериальной и венозной крови ( $C_{aO_2}$  и  $C_{vO_2}$ ). Для расчёта этих параметров мы модифицировали общепринятый способ с учётом того, что для более точной оценки кислородного бюджета количество кислорода следует измерять не объёмом, а его массой, поскольку известно, что 1 моль гемоглобина связывает 4 моля кислорода, объём которого может быть разным в зависимости от температуры и давления (формула 1). При этом строго придерживались единой системы единиц измерения – системы СГС (сантиметр-грамм-секунда), выражая конечные результаты в ряде случаев в общепринятых единицах.

$$C_{O_2} [\text{моль} / \text{мл}] = K_H [\text{моль} / \text{г}] \cdot C_{Hb} [\text{г} / \text{мл}] \cdot S_{O_2} + K_B [\text{моль} / \text{мл} \cdot \text{б}] \cdot (1 - C_{Ht}) \cdot p_{O_2} [\text{б}], \quad (1)$$

где  $K_H = 5,98 \cdot 10^{-5}$  моль/г – константа Гюфнера, отражающая массу кислорода, связываемую 1 граммом гемоглобина;  $C_{Hb}$  – концентрация гемоглобина, г/мл;  $S_{O_2}$  – доля насыщенного кислородом

гемоглобина;  $K_B = 1,04 \cdot 10^{-11}$  моль/мл·б – константа Бунзена, отражающий массу растворяющегося кислорода в единице объёма плазмы при единичном парциальном давлении кислорода в не ( $b = \text{дин/см}^2$ );  $p_{O_2}$  – парциальное давление кислорода в плазме.

Для оценки энергетики кровообращения также необходимо значение энергетического потенциала кислорода (ЭПК), при расчёте которого исходили из того, что при полном аэробном окислении 1 моля глюкозы требуется 6 молей кислорода и при этом выделяется 2880 кДж энергии. Таким образом, ЭПК равен  $4,8 \cdot 10^{12}$  эрг/моль.

Транспорт, потребление и коэффициент экстракции кислорода ( $T_{O_2}, V_{O_2}, E_{O_2}$ ) рассчитывали общепринятыми способами.

На основе выше описанных показателей рассчитывали следующие энергетические параметры кровообращения: мощность кровотока и его индекс (МКТ, ИМКТ), потребляемая тканями мощность и её индекс (ПТМ, ИПТМ), давление транспорта и потребления кислорода (ДТК, ДПК), кислородный резерв (КР) и циркуляторный резерв с его индексом (ЦР, ИЦР). Способы расчёта энергетических показателей и их интерпретация представлены ниже.

МКТ представляет собой полезную мощность миокарда, отдаваемую им кровотоку:

$$P_Q \left[ \frac{\text{эрг}}{\text{с}} \right] = p_{sc} \left[ \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3} \right] Q \left[ \frac{\text{см}^3}{\text{с}} \right] = \frac{p_{sc}^2}{R_{sc} \left[ \text{дин} \cdot \text{с} \cdot \text{см}^{-5} \right]} = Q^2 R_{sc} \quad (2)$$

где  $p_{sc}$  – СПД (SC – system circulation),  $Q$  – СВ,  $R_{sc}$  – ОПСС системного кровообращения. Поскольку один и тот же СВ может быть обеспечен при разной МКТ, можно было бы ввести удельную МКТ, то есть отношение МКТ к СВ, но оно равно СПД, следовательно, СПД может быть отнесено и к энергетическим показателям, так как отражает работу по перемещению единичного объёма крови и может измеряться не только в единицах давления, но и в единицах энергии на объём ( $\text{дин/см}^2 = \text{эрг/см}^3 = \text{эрг/мл}$ ).

ПТМ является скоростью потребления энергии тканями:

$$W_t \left[ \frac{\text{эрг}}{\text{с}} \right] = q \left[ \frac{\text{эрг}}{\text{моль}} \right] V_{O_2} \left[ \frac{\text{моль}}{\text{с}} \right] = qQ \left[ \frac{\text{см}^3}{\text{с}} \right] \cdot C_{(a-v)O_2} \left[ \frac{\text{моль}}{\text{см}^3} \right] \quad (3)$$

где  $q$  – ЭПК,  $C_{(a-v)O_2}$  – артериовенозная разница в содержании кислорода.

ДТК (формула 4) отражает энергию, затрачиваемую на перемещение кислорода по сосудистой системе. При этом надо иметь в виду, что основная часть этой энергии расходуется на движение самой крови. Чем ниже ДТК, тем большая часть энергии расходуется на доставку кислорода и меньшая – на удовлетворение других транспортных нужд, что может наблюдаться при недостаточности кровообращения. Высокое ДТК связано или со снижением содержания кислорода в крови или с артериальной гипертензией, при которой растут энергозатраты на кровообращение.

$$P_{T_{O_2}} \left[ \frac{\text{эрг}}{\text{моль}} \right] = \frac{P_Q \left[ \frac{\text{эрг}}{\text{с}} \right]}{T_{O_2} \left[ \frac{\text{моль}}{\text{с}} \right]} = \frac{p_{sc} Q}{C_{aO_2} Q} = \frac{p_{sc}}{C_{aO_2}} \quad (4)$$

Всё, что касается ДТК, относится и к ДПК, но связано со скоростью потребления тканями кислорода:

$$P_{V_{O_2}} \left[ \frac{\text{эрг}}{\text{моль}} \right] = \frac{P_Q \left[ \frac{\text{эрг}}{\text{с}} \right]}{V_{O_2} \left[ \frac{\text{моль}}{\text{с}} \right]} = \frac{p_{sc} Q}{C_{(a-v)O_2} Q} = \frac{p_{sc}}{C_{(a-v)O_2}} \quad (5)$$

Адекватность потребления тканями кислорода их нуждам отражает кислородный резерв (КР). Его расчёт основан на том, что при гипоксии всё большая часть глюкозы окисляется анаэробно, когда из 1 моля глюкозы образуется 2 моля лактата, то есть 1 моль лактата соответствует недоокислению 0,5 моля глюкозы или недоиспользованию 3 молей кислорода. КР равен отношению ПТМ к мощности, не полученной при полном аэробном окислении глюкозы (дефицит мощности,  $W_d$ ). Дефицит мощности, в свою очередь, равен утроенному ЭПК (3 моля кислорода, неиспользованные для полного окисления глюкозы), умноженному на концентрацию лактата  $L$ :

$$O_R = \frac{W_t}{W_d} = \frac{1}{3} \frac{C_{(a-v)O_2}}{L} \quad (6)$$

Низкий КР свидетельствует о несоответствии снабжения тканей кислородом их потребностям, высокий КР может свидетельствовать об адекватном удовлетворении повышенных потребностей тканей в кислороде (например, при физической нагрузке).

Интегральным энергетическим показателем является циркуляторный резерв (ЦР) и его индекс (ИЦР), равный произведению МКТ (ИМКТ) и КР:

$$P_{QR} = P_Q \frac{1}{3} \frac{C_{(a-v)O_2}}{L} \quad (7)$$

ЦР измеряется в единицах мощности. Его снижение наблюдается при недостаточности кровообращения.

Для использования предложенных показателей при оценке состояния кровообращения необходимо знать их значения при отсутствии её недостаточности. Были определены кинетические, динамические и гемические показатели, на основании которых были получены энергетические характеристики кровообращения. Затем были исследованы взаимозависимости между всеми полученными показателями.

Измерялись следующие показатели:

- кинетические: конечные диастолический и систолический объёмы (КДО, КСО) левого желудочка, ЧСС;
- динамические: систолическое и диастолическое артериальное давление (АДс, АДд);
- гемические: концентрация гемоглобина, гематокрит,  $S_{O_2}$  и  $P_{O_2}$  в артериальной и венозной крови.

Определялась также концентрация лактата в крови.

Рассчитывались следующие показатели:

- площадь поверхности тела по формуле Дюбуа [5];
- кинетические: ФВ, УИ, СИ;

– динамические:

АДэ как сумма АДд и трети пульсового давления, СПД, УПСС;

– гемические:

$$C_{aO_2}, C_{vO_2}, C_{(a-v)O_2}, E_{O_2}, T_{O_2}, V_{O_2};$$

– энергетические:

ИМКТ, ИПТМ, ДТК, ДПК, КР, ИЦР.

Показатели внутрисердечной гемодинамики измеряли с помощью эхокардиографии. ЦВД у здоровых добровольцев не измеряли в связи с инвазивностью процедуры. Поскольку ЦВД у здоровых лиц значительно меньше АДэ и практически не влияет на другие показатели, его приняли равным среднему нормальному значению (80 мм вод. ст.). Пробы артериальной крови получали при пункции лучевой артерии.

**Результаты исследования и их обсуждение.**

Кинетические и динамические показатели представлены в **таблице 1**.

На основании этих данных были рассчитаны границы энергетических показателей и их референтные значения (**табл. 2**).

Были исследованы зависимости энергетических показателей от кинетических, динамических и гемических.

ИМКТ ожидаемо был связан с механическими показателями кровообращения почти функционально. Коэффициенты корреляции ИМКТ с ФВ,

**Таблица 1** – Кинетические, динамические и гемические показатели здоровых добровольцев

Кинетические и динамические показатели (M±σ)							
ФВ, %	УИ, мл/м <sup>2</sup>	СИ, л/мин·м <sup>2</sup>	СПД, мм рт. ст.	УПСС, дин·с·см <sup>-5</sup> ·м <sup>2</sup>			
66,5±6,7	47,8±5,4	3,40±0,16	89,5±8,2	2100±127			
Гемические показатели (M±σ)							
Hb, г/л	Ht	S <sub>aO<sub>2</sub></sub>	S <sub>vO<sub>2</sub></sub>	P <sub>aO<sub>2</sub></sub> , мм рт. ст.	P <sub>vO<sub>2</sub></sub> , мм рт. ст.	C <sub>aO<sub>2</sub></sub> , мкмоль/мл	C <sub>vO<sub>2</sub></sub> , мкмоль/мл
134,8±9,3	0,41±0,02	0,96±0,01	0,74±0,02	95,0±1,9	42,0±1,1	8,53±0,53	6,32±0,38
C <sub>(a-v)O<sub>2</sub></sub> , мкмоль/мл		T <sub>O<sub>2</sub></sub> , мкмоль/с·м <sup>2</sup>		V <sub>O<sub>2</sub></sub> , мкмоль/с·м <sup>2</sup>		E <sub>O<sub>2</sub></sub> , %	
2,21±0,23		484±35		125±13		25,9±1,8	

**Примечания:** ФВ – фракция выброса, УИ – ударный индекс, СИ – сердечный индекс, СПД – системное перфузионное давление, УПСС – удельное периферическое сосудистое сопротивление, Hb – концентрация гемоглобина, Ht – гематокрит, S<sub>aO<sub>2</sub></sub> – насыщение гемоглобина артериальной крови кислородом, S<sub>vO<sub>2</sub></sub> – насыщение гемоглобина венозной крови кислородом, P<sub>aO<sub>2</sub></sub> – парциальное напряжение кислорода в артериальной крови, P<sub>vO<sub>2</sub></sub> – парциальное напряжение кислорода в венозной крови, C<sub>aO<sub>2</sub></sub> – содержание кислорода в артериальной крови, C<sub>vO<sub>2</sub></sub> – содержание кислорода в венозной крови, C<sub>(a-v)O<sub>2</sub></sub> – артериовенозная разница по содержанию кислорода, T<sub>O<sub>2</sub></sub> – транспорт кислорода, V<sub>O<sub>2</sub></sub> – потребление кислорода, E<sub>O<sub>2</sub></sub> – коэффициент экстракции кислорода.

**Таблиця 2** – Энергетические показатели здоровых добровольцев

Показатель	Обозначение	Единицы измерения	Min	Max	M±σ
ИМКТ	$P_{QI}$	мВт/м <sup>2</sup>	506	879	678±90
ИПТМ	$W_{II}$	Вт/м <sup>2</sup>	47	75	60,1±6,4
ДТК	$P_{TO_2}$	кДж/моль	1,12	1,71	1,40±0,17
ДПК	$P_{VO_2}$	кДж/моль	4,17	6,86	5,46±0,84
КР	$O_R$	–	0,60	1,58	0,91±0,21
ИЦР	$P_{QRI}$	мВт/м <sup>2</sup>	351	938	617±145

**Примечания:** ИМКТ – индекс мощности кровотока, ИПТМ – индекс потребляемой тканями мощности, ДТК – давление транспорта кислорода, ДПК – давление потребления кислорода, КР – кислородный резерв, ИЦР – индекс циркуляторного резерва.

УИ, СИ, СПД и УПСС составляли соответственно 0,95±0,02, 0,96±0,02, 0,92±0,03, 0,98±0,01 и 0,78±0,07. Это следует расценивать как то, что кинетическая мощность кровотока определяется сократительной способностью миокарда (ССМ). Тесная положительная связь ИМКТ и УПСС отражает наличие у миокарда достаточных энергетических резервов на преодоление сосудистого сопротивления. Из гемических показателей ИМКТ был умеренно связан только с  $T_{O_2}$  ( $r = 0,45±0,15$ ), то есть у здоровых в состоянии покоя кислородный бюджет мало зависит от энергии кровотока и в основном регулируется на местном тканевом уровне. Это подтверждается и отсутствием связи у ИМКТ с ИПТМ и КР. Связь ИМКТ с ИЦР была слабой ( $r = 0,35±0,16$ ).

ИПТМ, в отличие от ИМКТ, у здоровых не зависел от механических параметров кровообращения, зато тесно был связан с гемическими, прежде всего – с  $C_{(a-v)O_2}$  ( $r = 0,91±0,03$ ), что определяется природой этих показателей. Связей ИПТМ с КР и ИЦР не выявлено, что можно рассматривать как наличие большого резерва у регуляторных механизмов кислородного бюджета, которые могут быть реализованы в случае возрастания потребностей тканей в энергии.

Из двух показателей (ИМКТ и КР), определяющих ИЦР, последний был тесно связан только с КР ( $r = 0,84±0,05$ ), что также отражает достаточные энергетические резервы миокарда.

В настоящее время, к сожалению, вопросам энергообмена не уделяется должного внимания, а в немногочисленных исследованиях, посвящённых этой проблематике [3, 6], имеется много неточностей и отсутствует строгий системный подход. Это касается, в частности, единиц измерения и методов расчёта показателей кровообращения, кислородного бюджета и энергии, неправильное использование которых может приводить иногда к абсурдным результатам. Мы постарались избежать этого, строго основываясь на физических законах и выбрав в качестве основной системы единиц измерения систему СГС (сантиметр-грамм-секунда) как наиболее подходящую к размерам решаемых задач. Предложенные показатели энергетике кровообращения, на наш взгляд, позволяют полнее описывать состояние системы кровообращения в частности и энергообмен между организмом и внешней средой в целом.

Таким образом, энергетические параметры кровообращения у здоровых лиц естественным образом зависели от механических – кинетических и динамических. В то же время энергетический бюджет тканей, отражаемый КР и ЦР, определялся и механическими и энергетическими показателями в незначительной степени, что можно рассматривать как свидетельство преобладания местных механизмов регуляции энергобюджета над центральными, наблюдаемого в состоянии покоя в отсутствие напряжения компенсации.

#### Выводы

1. Снабжение организма энергией само по себе требует затрат энергии, то есть имеет энергетическую (кислородную) цену.
2. Энергетические параметры кровообращения определяются механическими – кинетическими и динамическими.
3. В отсутствие напряжения компенсаторных механизмов (здоровый организм в состоянии покоя) потребление тканями энергии регулируется в основном местными механизмами без участия более высоких уровней регуляции.

#### Перспективы дальнейших исследований.

Дальнейшие исследования в данной области будут направлены на изучение энергетике кровотока при сосудистой недостаточности и гиповолемии, что даст возможность полнее контролировать процесс интенсивной терапии вести поиск её оптимальных методов.

#### References

1. Ivanov KP. Novye biologicheskie problemy v energetike zhivyykh sistem [New biological problems in the energy of living systems]. *Uspekhi sovremennoy biologii*. 2016; 136(6): 586-92. [Russian]
2. Ivanov KP. Energiya i zhizn [Energy and life]. *Uspekhi sovremennoy biologii*. 2008; 128(6): 606-19. [Russian]

3. Folkov B, Nil E. *Krovoobrashchenie* [Blood circulation]. Per s angl. M: Meditsina; 1976. 463 s. [Russian]
4. Mikhnevich KG, Volkova YuV, Khartanovich MV, Lizogub MV. *Energetichni aspekti krovoobigu* [Energetic aspects of blood circulation]. Monografiya. Kh: TOV «Planeta-Print»; 2020. 165 s. [Ukrainian]
5. DuBois D, DuBois EF. A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. *Arch Intern Med.* 1916; 17: 863-71.
6. Usenko LV, Shifrin GA. *Intensivnaya terapiya pri krovopotere* [Intensive care for blood loss]. Izd 3-e, kontseptualnoe i innovatsionnoe. Dnepropetrovsk: Novaya ideologiya; 2007. 290 s. [Russian]

УДК [612.13:616-005]-072

### ВИЗНАЧЕННЯ РЕФЕРЕНТНИХ ЗНАЧЕНЬ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ КРОВООБІГУ

*Михневич К. Г., Волкова Ю. В.,*

*Баранова Н. В., Бойко О. В.*

**Резюме.** Постачання тканин енергією, необхідною для підтримки життєдіяльності, здійснюється шляхом транспорту носія потенційної хімічної енергії – кисню – з атмосфери. У цьому процесі бере участь система кровообігу, для роботи якої також потрібна енергія і, отже, кисень, тобто енергопостачання організму має енергетичну ціну. Головним кінетичним показником системи кровообігу є серцевий викид, однаковий рівень якого може бути забезпечений при різних енерговитратах (при різній кисневій ціні). Таким чином, облік енергетики кровообігу необхідний для повної оцінки стану системи кровообігу при різних варіантах її недостатності, але для цього перш за все необхідно визначити референтні межі коливань енергетичних параметрів кровообігу, що і стало метою даного дослідження.

Для дослідження енергетики кровообігу нами розроблений ряд показників, для розрахунку яких необхідно визначення механічних (кінетичних і динамічних) параметрів кровообігу і облік гемічної ланки транспорту кисню. До вимірюваних кінетичних показників віднесені ударний об'єм, фракція викиду, частота серцевих скорочень, серцевий викид і відповідні їм індекси (ударний і серцевий). Динамічними показниками є системний перфузійний тиск і загальний периферійний судинний опір з його індексом – питомий периферійний судинний опір. За загальноприйнятими гемічними показниками розраховували вміст кисню в крові, його транспорт і споживання.

На підставі цих показників були визначені референтні межі коливань енергетичних параметрів кровообігу: потужності кровотоку, споживаної тканинами потужності, тиск транспорту і споживання кисню, кисневий резерв і циркуляторний резерв. Потужність кровотоку, споживана тканинами потужність і циркуляторний резерв нормували до площі поверхні тіла з отриманням відповідних індексів (ІПКТ, ІСТП, ІЦР).

У здорових осіб, що знаходяться в стані спокою, енергетичні показники кровообігу визначалися механічними параметрами, в той час, як енергетичний бюджет тканин від них практично не залежав, що ми пояснюємо відсутністю напруженості компенсації.

**Ключові слова:** енергетика кровообігу, транспорт кисню, потужність кровотоку.

UDC [612.13:616-005]-072

### Determination of reference values of energy parameters of circulation

*Mykhnevych K. G., Volkova Yu. V.,*

*Baranova N. V., Boiko O. V.*

**Abstract.** The energy supply of tissues necessary for life support is carried out by transporting of the carrier of potential chemical energy (oxygen) from the atmosphere. This process involves the circulatory system, which also needs energy and, therefore, oxygen, so the energy supply of the body has an energy price. The main kinetic parameter of circulatory system is the cardiac output, the same level of which can be provided at different energy costs (at different oxygen prices). Thus, the consideration of energy circulation is necessary for a full assessment of the circulatory system in different types of its failure, but it is first necessary to determine the reference limits fluctuations of the energy parameters of circulation, which was the purpose of this study.

To study the energy of circulation we developed a number of parameters, for the calculation of which it is necessary to determine the mechanical (kinetic and dynamic) parameters of circulation and account for the hemic link of oxygen transport. The measured kinetic parameters include systolic volume, ejection fraction, heart rate, cardiac output and their corresponding indices (stroke and cardiac). Dynamic parameters are system perfusion pressure and total peripheral vascular resistance with its index – specific peripheral vascular resistance. The oxygen content in the blood, its transport and consumption were calculated based on generally accepted hemic indicators.

Based on these parameters, reference limits of fluctuations in the energy parameters of circulation were determined: flow power, tissue power consumption, oxygen transport and consumption pressure, oxygen reserve and circulatory reserve. Flow power, tissue power consumption and circulatory reserve were normalized to the surface square of the body to obtain the corresponding indices (IFP, ITPC, ICR).

Flow power is the useful power of the myocardium. Tissue power consumption is the rate of energy consumption by tissues. Oxygen transport pressure reflects the energy spent on moving oxygen through the vascular system. The lower the oxygen transport pressure, the more energy is spent on delivering oxygen and less is spent on meeting other transport needs, which can be observed in cases of circulatory insufficiency. High oxygen transport pressure is associated either a decrease in the oxygen content in the blood or arterial hypertension, which increases the energy consumption for blood circulation. Everything that concerns oxygen transport pressure applies to oxygen consumption pressure, but it is related to the rate of oxygen consumption by tissues. The adequacy of oxygen consumption by tissues to their needs is reflected by oxygen reserve. A low oxygen reserve indicates that the supply of oxygen to tissues does not correspond to their needs; a high oxygen reserve may indicate that the increased oxygen needs of tissues are adequately met. Circulatory reserve is the integral energy parameter. Its decrease is observed when there is a circulatory failure.

*Conclusion.* We determined the energy indicators of circulation by mechanical parameters in healthy individuals at the state of rest. The energy budget of tissues was practically independent of energy indicators of circulation, which can be explained by the low compensation intensity.

**Keywords:** energy of circulation, oxygen transport, blood flow power.

*The authors of this study confirm that the research and publication of the results were not associated with any conflicts regarding commercial or financial relations, relations with organizations and/or individuals who may have been related to the study, and interrelations of coauthors of the article.*

Стаття надійшла 25.05.2020 р.

Рекомендована до друку на засіданні редакційної колегії після рецензування