

**Диагностические возможности чрескожного определения
напряжения кислорода и углекислого газа у больных
с хронической ишемией нижних конечностей**

Российский научный центр «Восстановительная травматология и ортопедия»

им. акад. Г. А. Илизарова

e-mail: elena.shurova@mail.ru

Реферат

На основе анализа отечественных и иностранных научных публикаций представлен современный взгляд на диагностические возможности чрескожного определения напряжения кислорода и углекислого газа в покое и при проведении функциональных проб у больных с хронической ишемией нижних конечностей и синдромом диабетической стопы.

Ключевые слова: чрескожное определение напряжения кислорода, чрескожное определение напряжения углекислого газа, хроническая ишемия нижних конечностей, синдром диабетической стопы.

Shchurova E. N., Korabelnikov Yu. A., Rechkin M. Yu

The diagnostic means for percutaneous determination of oxygen and carbon dioxide tension in patients with chronic ischemia of lower limbs

Federal State Institution Russian Ilizarov Scientific Center for Restorative Traumatology and Orthopaedics

e-mail: elena.shurova@mail.ru

Abstract

Based on analyzing scientific publications of our country and foreign ones the authors present modern points of view concerning the diagnostic means of percutaneous determination of oxygen and carbon dioxide tension at rest and during functional testing in patients with lower limb chronic ischemia and diabetic foot syndrome.

Keywords: percutaneous determination of oxygen tension, percutaneous determination of carbon dioxide tension, chronic ischemia of lower limbs, diabetic foot syndrome.

Введение

В настоящее время в большинстве клиник мира является обязательным наличие чрескожного мониторинга напряжения кислорода и углекислого газа в структуре диагностических и реанимационных подразделений. Несмотря на то, что этот метод исследования используется больше 20 лет, не все аспекты применения и диагностических возможностей освещены, остаются спорными некоторые моменты интерпретации полученных данных. Особенно интересным и важным является применение чрескожного мониторинга газов при хронической ишемии конечностей.

Поскольку чрескожный мониторинг напряжения кислорода стал применяться раньше и имеет большее распространение, чем определение напряжения углекислого газа, в первую очередь, необходимо проанализировать использование $T_{sp}O_2$ при лечении

и диагностике больных с хронической ишемией нижних конечностей.

Чрескожный (транскутанный) мониторинг напряжения кислорода ($T_{sp}O_2$)

С начала 80-х гг. чрескожное определение напряжения кислорода постепенно стало ценнейшим орудием в клинической практике для обследования больных с облитерирующими поражениями артерий нижних конечностей.

Чрескожная полярография является неинвазивным диагностическим методом, с помощью которого регистрируют парциальное давление кислорода в поверхностных слоях кожи [8, 10, 37, 45, 50, 71]. Уровень $T_{sp}O_2$ отражает доставку кислорода к определенному участку кожи, к его микроциркуляторному руслу. Кроме того, существует взаимосвязь

ОБЗОРЫ

между транскутанным давлением кислорода и парциальным давлением кислорода в тканях [22].

Идея бескровного измерения содержания кислорода в коже была впервые реализована в 1951 г. М. Baumberger и R. Goodfriend [9], которые использовали для этого ртутный каплевидный электрод в подогретом буферном растворе, куда был помещен палец испытуемого. При этом было обнаружено, что напряжение кислорода буферного раствора приближается к значению pO_2 артериальной крови. Вследствие сложности и недостаточной точности получаемых результатов этот метод в то время не нашел широкого распространения. Новые возможности появились после изобретения модифицированных электродов типа Clark [35] со специальным нагревательным устройством для длительного определения $TcpO_2$.

В настоящее время в клинической практике при обследовании больных получили широкое применение оксимониторы различных фирм: *Radiometr* (Дания); *Hellige* (Германия); *Universal-PO2-Meter MO 10.1* (PRACITRONIC, Dresden, GDR); *Instrumentation Laboratory* (США); *Novamatrix Medical Systems* (США) и др. При определении чрескожного напряжения кислорода используется накожный согревающий датчик типа Clark. Датчик крепится на обезжиренный участок кожи с помощью специального адгезивного кольца. Электрод нагревается до 42–44°C. Создаваемая с помощью тепла локальная реактивная гиперемия стимулирует увеличение местного кровообращения и диффузию газов через мембрану электрода. Кислород при проникновении через мембрану вызывает электрохимическую реакцию и генерирует потенциал, проходящий через катод. Данный потенциал конвертируется усилителем в величину, пропорциональную напряжению кислорода на поверхности мембраны, и информация появляется на экране монитора как $TcpO_2$ в мм рт. ст.

Известно, что молекула растворенного кислорода не имеет электрического заряда и достигает поверхности рабочего электрода в силу процесса диффузии. При определенных значениях потенциала электрода все молекулы кислорода в приэлектродном слое восстанавливаются до воды:



Напряжение кислорода в приэлектродном слое резко снижается, в результате чего к нему диффундируют молекулы кислорода из ткани, и процесс приобретает непрерывный характер.

Напряжение кислорода в капиллярной крови — первый важный параметр, от которого зависят результаты измерения. Повышение температуры электрода и подлежащего участка кожи приводит к артериализации капиллярной крови, как следствие, напряжение кислорода в капиллярной крови при нормальном кровоснабжении приближается к таковому артериальной крови [1, 9]. Другой важный параметр, который влияет на $TcpO_2$ — интенсивность кровотока. Хотя играют роль и другие факторы, такие как кривая диссоциации гемоглобина, температура электрода, толщина эпидермиса, проницаемость

кожи, проницаемость самой мембраны, расстояние между поверхностью кожи и мембраной электрода, метаболическая активность клеток [14].

Принципиально чрескожная оксиметрия позволяет решить две задачи: осуществлять мониторинг содержания кислорода в крови (при сохранном и стабильном кровоснабжении) или определить степень нарушения кровоснабжения (при постоянном содержании кислорода в крови) [1]. Во втором варианте данный метод применяется в основном для выявления критической ишемии; определения вероятности заживления язвы; оценки эффективности терапевтического лечения; отбора больных для ГБО и оценки эффективности этого метода; определения необходимости ампутации; определения уровня ампутации; определения вероятности приживления кожного лоскута при трансплантации.

По мнению одних авторов, измеряемое таким электродом транскутанное напряжение кислорода достоверно коррелирует с напряжением кислорода артериальной крови как новорожденных детей, так и у взрослых, и количественно характеризует кожный кровоток [10, 16]. Однако другие исследователи утверждают, что даже при нормальном кровоснабжении измеряемая величина $TcpO_2$ обычно несколько ниже, чем напряжение кислорода в артериальной крови [64], и больше связана с уровнем давления кислорода в смешанной венозной крови, за исключением декомпенсированных и терминальных состояний [22].

М. L. Franklin [43] считал, что только у новорожденных и младенцев чрескожное измерение газов с применением обычных электрохимических методов может являться средством определения значений PaO_2 и $PaCO_2$. У пациентов с риском нарушения сердечно-сосудистой и легочной функций и у многих взрослых лиц (из-за разной структуры кожи) чрескожный мониторинг газов не будет точно отражать напряжения газов артериальной крови, поскольку чрескожное напряжение газов зависит от перфузии кожи. Но данный метод может пригодиться при мониторинге тканевой перфузии, особенно у пациентов с периферическим сосудистым заболеванием и при пересадке тканевых лоскутов.

Такого же мнения придерживается и K. Rich [63]: чрескожное определение напряжения кислорода можно использовать при обследовании взрослых людей для анализа состояния раны, в процессе проведения гипербарической терапии, пластических хирургических операций, для определения уровня ампутации, оценки тяжести хронической артериальной недостаточности и результатов реваскуляризации конечности.

Прежде чем анализировать использование данного метода исследования у больных с хронической ишемией нижних конечностей, необходимо осветить величины чрескожного напряжения кислорода человека в норме.

Рассмотрим значения чрескожного напряжения кислорода у здоровых взрослых людей на различных сегментах конечности и частей тела. Так, по данным литературы [8, 12, 21, 42], на уровне груди $TcpO_2$

составляет $64,0 \pm 1,3$ мм рт. ст., на бедре — $61,0 \pm 1,5$ — $62,0 \pm 1,75$ мм рт. ст., на голени — $55,4 \pm 1,8$ — $59,4 \pm 1,5$ мм рт. ст., на стопе — $52,0 \pm 1,12$ — $54,6 \pm 1,3$ мм рт. ст. Следовательно, по данным этих авторов, чрескожное напряжение кислорода на стопе меньше, чем на уровне груди, бедра и голени, где цифры достоверно не различаются.

Точкой для измерения $TcPO_2$ при хронической ишемии конечности чаще всего служит стопа (первый межпальцевой промежуток), хотя возможно измерение в любой другой доступной зоне. Исследование проводят в положении лежа на спине. Диапазон варьирования нормативных значений напряжения кислорода в коже стопы взрослых людей, представленных в литературе достаточно широк — от 40 мм рт. ст. до 65 мм рт. ст. По данным одних авторов [2, 65, 71], напряжение кислорода в коже стопы ($TcPO_2$) в горизонтальном положении составляет ≥ 40 мм рт. ст. Другие исследователи приводят более высокие значения этого показателя: $52,0 \pm 1,12$ мм рт. ст. [8], $53,0 \pm 1,1$ мм рт. ст. [12], $54,6 \pm 1,3$ мм рт. ст. [21], $53,8 \pm 1,6$ мм рт. ст. [42].

В документах Российского консенсуса — 2002 [4] опубликованы величины нормальных значений $TcPO_2$ и они составляют 50–60 мм рт. ст. В руководстве для врачей «Клиническая ангиология» 2004 [9] приводятся значения чрескожного напряжения кислорода в коже стопы у здоровых людей значительно выше — 65 мм рт. ст.

В «Национальных стандартах оказания помощи больным сахарным диабетом», утвержденных Минздравом РФ в 2002 г. [15], устанавливается для чрескожного напряжения кислорода величина 40 мм рт. ст., как нижняя граница нормы.

Следует заметить, что напряжение кислорода в артериальной крови здоровых людей в возрасте от 25 до 70 лет в покое составляет 87,5 (от 75 до 100 мм рт. ст.) [20], что значительно выше чрескожного напряжения кислорода во всех областях исследования. Это, по всей видимости, обусловлено особенностью строения кожи и снижением уровня капилляризации ткани, изменением регуляции сосудов взрослых обследуемых относительно детей, у которых $TcPO_2$ при нормальном кровоснабжении может соответствовать напряжению кислорода в артериальной крови.

Кроме того, у здоровых людей с возрастом (от 25 до 70 лет) происходит значительное снижение $TcPO_2$ (при температуре электрода 44°C) в покое и при проведении фармакологических проб (капсаицин) [56].

Таким образом, анализируя вышеизложенное, можно сделать вывод, что значения чрескожного напряжения кислорода в коже стопы больше 40 мм рт. ст. являются нормальными, и эта величина определяется как нижняя граница нормы. $TcPO_2$ у здоровых взрослых людей на различных частях тела и сегментах конечности значительно меньше, чем напряжение кислорода в артериальной крови.

А. Tonnesen в 1978 г. [9] впервые установил, что при заболевании сосудов на нижних конечностях происходит значительное снижение $TcPO_2$ по сравнению с pO_2 артериальной крови. Капиллярная микроскопия подтверждает гетерогенность кожного

микроциркуляторного кровотока, что сопровождается снижением $TcPO_2$ [44]. Необходимо отметить, что наличие отека (в том числе и постишемического) тканей стопы может занижать значение $TcPO_2$.

Кроме того, А. Tonnesen выявил корреляционную зависимость между тяжестью хронической артериальной недостаточности и $TcPO_2$. Данный факт подтвердился результатами исследований многих авторов в последующие годы [10, 21, 23, 26, 42, 66, 70].

По данным А. Клэйес и др. [10] при 2-й стадии недостаточности кровообращения $TcPO_2$ в коже стопы напряжение кислорода составляло 37,7 мм рт. ст., при 3-й стадии — 22,3 мм рт. ст., при 4-й стадии — 14 мм рт. ст. Другие авторы [23, 58] приводят несколько иные значения: 2-я стадия — 43 ± 2 мм рт. ст., 3–4-я стадии — 15 ± 3 мм рт. ст. Следует заметить, что в группе больных 4 стадии почти в 50 % случаев чрескожное напряжение кислорода не определялось (0 мм рт. ст.) [21].

Также была установлена взаимосвязь между значениями транскутанного напряжения кислорода и лодыжечно-плечевого индекса (ЛПИ): при уменьшении ЛПИ снижается и напряжение кислорода в тканях [9, 21]. В работе В. И. Шевцова и др. [21] эта зависимость описана уравнением линейной регрессии с наличием прямой зависимости между ЛПИ и напряжением кислорода в коже стопы.

Однако взаимосвязь непосредственно лодыжечного давления и $TcPO_2$, по данным Y. Liu et al. [49], носит гиперболический характер. Чрескожное напряжение кислорода остается относительно постоянным при достаточном кровоснабжении, небольшое изменение лодыжечного давления сопровождается большим изменением $TcPO_2$. Авторы делают вывод, что при критической ишемии изменения $TcPO_2$ являются более чувствительными, чем изменения лодыжечного давления.

В связи с тем, что наибольшее поражение микрососудистого русла встречается при 3–4-й стадиях хронической артериальной недостаточности, принято считать, что методику измерения $TcPO_2$ более целесообразно применять в стадии критической ишемии [9].

Значение $TcPO_2$ как теста кислородного обеспечения тканей может служить критерием заживления трофических расстройств. Так, по данным F. T. Padberg et al. [57], который использовал в своих исследованиях три показателя в определении вероятности заживления трофических расстройств у больных с хронической ишемией нижних конечностей ($TcPO_2$, сегментарное артериальное давление, артериальные сегментарные индексы давления), наиболее информативным оказалось $TcPO_2$. Точность данного метода исследования составляла 83 %.

Величины $TcPO_2$, характеризующие наличие потенциальных возможностей самостоятельной репарации тканей у больных с трофическими нарушениями, по данным разных литературных источников, несколько различаются. По мнению авторов [9], язвы заживают на фоне местного лечения при значениях $TcPO_2$ более 50 мм рт. ст. В материалах Российского

ОБЗОРЫ

консенсуса – 2002 [4] показано, что при напряжении кислорода выше 40 мм рт. ст. можно ожидать самостоятельной репарации тканей. I. Got [45] считает, что величина $TcPO_2 \geq 30$ мм рт. ст. является прогностическим фактором спонтанного заживления. Следовательно, суммируя все эти данные, можно сделать вывод, что при значениях ≥ 30 мм рт. ст. существует потенциал самостоятельного заживления трофических нарушений у больных с хронической ишемией конечностей.

Если значения $TcPO_2$ на стопе ниже 30 мм рт. ст., трофические язвы не заживают самостоятельно и требуют либо консервативной терапии, либо реконструктивной операции [4, 9, 48]. При чрескожном напряжении кислорода меньше 10 мм рт. ст. следует ожидать неблагоприятного исхода лечения с повышенным риском ампутации [31, 45].

При определении уровня ампутации конечности у больных с облитерирующими поражениями сосудов в терминальной стадии заболевания чрескожное напряжение кислорода остается незаменимым. Использование показателя чрескожного напряжения кислорода для определения уровня ампутации описывалось многими авторами.

По данным Б. Р. Кабулия и др. [8], больные, нуждающиеся в ампутации, имеют следующие значения показателей напряжения кислорода на разных уровнях тела: грудной отдел — $58,6 \pm 1,7$ мм рт. ст.; бедренный сегмент — $49,5 \pm 1,7$ мм рт. ст.; голень — $34,5 \pm 1,8$ мм рт. ст.; стопа — $22,9 \pm 1,4$ мм рт. ст. Следовательно, у больных данной категории напряжение кислорода снижено на всех уровнях исследования относительно значений нормы (норма представлена выше).

S. Cyba-Altunbay et al. [37] провели в 1986 г. комплексное исследование (203 конечности) по поводу определения уровня ампутации у больных с конечной стадией артериальной недостаточности. Они осуществляли чрескожное измерение кислорода на 10–12 участках конечности (как по длинной оси, так и по окружности) и пришли к выводу, что данный метод исследования позволяет определить оптимальный уровень ампутации с точностью до 90% при условии заживления культи. Первоначально выбранная величина 35 мм рт. ст. сопровождалась большим количеством повторных ампутаций. Переход к величинам порядка 45 мм рт. ст. привел к уменьшению на 9 % ампутаций на голени и увеличению на 8 % количества ампутаций на уровне коленного сустава, в то же время отмечено резкое падение (на 50 %) частоты повторных ампутаций и уменьшение летальности (с 7,1 до 2,7 %). Особенно большое значение метод чрескожного определения кислорода имел при выборе уровня ампутации на бедре, количество которых удалось снизить с 64,3 до 25 %.

Б. Р. Кабулия и др. [8] определили, что если у больного до ампутации $TcPO_2$ регистрировалось:

1) от 30–72 мм рт. ст. (в среднем $45,7 \pm 2,3$ мм рт. ст.) и вдыхание 100 %-й кислородной смеси увеличивает чрескожное напряжение кислорода до 140–300 мм рт. ст., а опускание ноги на 90° увеличивает ($TcPO_2$) на 50–70 %, то отмечается успешная ампутация с первичным заживлением;

2) от 10 до 35 мм рт. ст. (в среднем — $23,7 \pm 1,6$ мм рт. ст.), то наблюдается медленное заживление после ампутации и осложнения (раны, некроз, инфекции), но без реампутации;

3) от 0 до 6 мм рт. ст. и при вдыхании кислородной смеси и опускании конечности не наблюдалось реакции $TcPO_2$, то выполняется реампутация на более проксимальном уровне.

По мнению А. В. Покровского [9], при планировании уровня ампутации и прогнозировании заживления ампутационной культи можно ориентироваться на значения этого показателя: 40–50 мм рт. ст. на уровне ампутации в большинстве случаев достаточно для первичного заживления.

Таким образом, большинство авторов считают, что при величине чрескожного напряжения кислорода 40–50 мм рт. ст. на уровне ампутации можно ожидать успешного первичного заживления.

После консервативного лечения и реконструктивной сосудистой операции чрескожное определение напряжения кислорода позволяет контролировать результаты. В случаях благоприятного исхода лечения напряжение кислорода в коже значительно увеличивается. При небольшом приросте кислорода после оперативного вмешательства и значениях $TcPO_2$ меньше 30 мм рт. ст. целесообразно продолжение консервативной терапии или рассмотрение вопроса о дополнительном реконструктивном вмешательстве [9].

S. G. Lalka et al. [48] для оценки результатов $TcPO_2$ реконструктивных операций использовали не только на стопе, но и в области грудной клетки. Эти авторы установили, что $TcPO_2$ и индекс $TcPO_2$ стопы/ $TcPO_2$ грудной клетки являются наиболее чувствительными показателями тяжести ишемии, они дают более достоверные прогнозы после операции, чем лодыжечное давление и лодыжечно-брахиальный индекс давления. Показатели чрескожного напряжения кислорода до операции $TcPO_2$ 22 мм рт. ст. и индекс $TcPO_2$ стопы/ $TcPO_2$ грудной клетки $\leq 0,46$ свидетельствовали о тяжелой ишемии и необходимости реконструктивной операции. Послеоперационные значения $TcPO_2 \leq 22$ мм рт. ст. и индекс $TcPO_2$ стопы/ $TcPO_2$ грудной клетки $\leq 0,53$ указывали на плохую реваскуляризацию. По мнению этих авторов, $TcPO_2$ — более адекватный показатель при ишемии конечности и более точный прогнозирующий показатель, чем гемодинамический тест давления.

По данным M. Stalc, P. Poredos [67], определение $TcPO_2$ является информативным методом исследования клинического эффекта чрескожной трансламинарной ангиопластики (ЧТА). После успешного проведения ЧТА $TcPO_2$, определяемый на стопе в состоянии покоя, повышался у пациентов 3-й и 4-й стадий сразу после ЧТА (с 14–18 мм рт. ст. до 25–32 мм рт. ст.) и снова увеличивался через 6 недель. Таким образом, для полной нормализации микроциркуляции при данном способе лечения может потребоваться несколько недель, особенно в терминальной стадии заболевания.

И. О. Липатова и др. [12] осуществляли контроль за эффективностью консервативного лечения, вклю-

чающего медикаментозную и лазерную терапию с привлечением TcPO_2 . Наблюдая динамику TcPO_2 при выполнении постуральной пробы у больных облитерирующим атеросклерозом сосудов нижних конечностей до и после применения комплексной консервативной терапии, сделали вывод о росте функциональных возможностей и резервов кровоснабжения в подгруппе с исходным напряжением кислорода от 20 до 40 мм рт. ст. под воздействием лечения.

Таким образом, можно сделать вывод, что для положительного эффекта лечения необходимо наличие исходного уровня TcPO_2 в коже стопы не менее 20 мм рт. ст. и выраженного прироста после проведенной терапии, возможно, и отсроченного во времени.

Для повышения информативности чрескожного определения кислорода используют различные функциональные пробы [7, 33, 53, 66]. Под воздействием этих проб происходит временное изменение показателей макро- и микрогемодинамики. Фиксируя степень изменения и время восстановления этих показателей, получают важную дополнительную информацию о резервных возможностях сосудистого русла тканей и об эффективности проведенного оперативного лечения. При проведении подобного рода исследований используют кислородную, ортостатическую, постуральную, ишемическую пробы и физическую нагрузку.

Одной из наиболее распространенных функциональных проб является «кислородная проба». Она предусматривает исследование динамики чрескожного напряжения кислорода после вдыхания кислорода [5, 11, 28, 53]. Некоторые исследователи используют при вдыхании чистый кислород (100 %) в течение 2–10 минут [8, 11, 53, 71]. Другие авторы применяют газовые смеси с повышенным содержанием кислорода (40 %) [28].

У здоровых людей вдыхание кислорода или газовой смеси с повышенной концентрацией кислорода чрескожное напряжение кислорода (TcPO_2) в коже стопы не меняется, однако снижается кровоток кожи стопы и большого пальца. У больных с умеренным облитерирующим поражением артерий нижних конечностей наблюдается аналогичная реакция, но с увеличением TcPO_2 в коже стопы [28, 53]. У больных с тяжелыми формами данного заболевания отмечается увеличение общего кровотока и кровотока кожи стопы и пальца без увеличения TcPO_2 на стопе [28, 71]. Неизменность TcPO_2 на стопе при вдыхании кислорода у больных данной категории говорит о том, что ткани конечности находятся в состоянии глубокой гипоксии и весь кислород идет на погашение долга [11, 71].

Результаты кислородной пробы используют в прогнозировании клинического эффекта реконструкции сосудов и заживлении культи после ампутации конечности [8, 53]. Так, по результатам исследования Н. Мооса et al. [53] повышение TcPO_2 после ингаляции кислорода до оперативного лечения указывает на то, что реконструкция сосудов окажется эффективной.

Не менее популярной пробой при исследовании чрескожного напряжения кислорода в коже конеч-

ности у больных с хронической ишемией является «ортостатическая» проба. Проведение этой пробы предусматривает определение прироста напряжения кислорода кожи в вертикальном положении обследуемого. Измерение проводят в течение 5–6 минут до стабилизации показателей [2, 13, 17]. У здоровых исследуемых прирост чрескожного напряжения кислорода на стопе от исходного уровня (горизонтальное положение) составляет $33,5 \pm 1,2$ мм рт. ст. [2]. При поражении аortoбедренного сегмента величина прироста значительно меньше и составляет $12,5 \pm 2,8$ мм рт. ст., в случаях облитерации бедренно-подколенного сегмента прирост несколько выше — $13,5 \pm 2,7$ мм рт. ст.

По данным В. Н. Пшеничного [17], у больных с положительным эффектом васкуляризации прирост чрескожного напряжения кислорода при ортопробе был $>17,5$ мм рт. ст., с отрицательным результатом $<14,5$ мм рт. ст. Автор делает вывод, что увеличение в вертикальном положении напряжения кислорода на стопе ≥ 20 мм рт. ст. до операции является положительным прогностическим признаком при реваскуляризации конечности. Однако, по выводам Е. Г. Микульской и др. [13], эта граница сдвинута на 10 мм рт. ст. вверх (>30 мм рт. ст.).

Проведение «постуральной» пробы предусматривает регистрацию динамики чрескожного напряжения кислорода при опускании ноги под углом 90° или поднятии ноги под углом 45° [26, 33, 53, 62].

Опускание ноги под углом 90° у здоровых обследуемых не приводит к значительным изменениям чрескожного напряжения кислорода на стопе. У больных 2-й, 3-й и 4-й стадий ишемии происходит увеличение этого показателя на 10, 65, 76,2 % соответственно [26, 53].

Поднятие ноги под углом 45° у здоровых обследуемых не приводит к значительным изменениям чрескожного напряжения кислорода на стопе. У больных 2-й, 3-й и 4-й стадий ишемии происходит снижение чрескожного напряжения кислорода на 18, 55,3, 65,8 % соответственно.

Результаты данной пробы используют в прогнозировании результатов лечения и ампутации по оценке сохранных резервных возможностей кровоснабжения [8, 12].

При проведении «ишемической пробы» накладывают стандартную манжету проксимальнее зоны измерения и производят компрессию (250 мм рт. ст.) в течение 3-х минут. В постишемическом периоде регистрируют динамику напряжения кислорода, которая позволяет оценить резервы исследуемых тканей [5, 11, 23, 42]. В наибольшей степени информативны следующие показатели: время истощения половины запаса кислорода, время полного истощения запаса кислорода, время восстановления запаса кислорода, время максимального прироста кислорода.

Время истощения половины запаса кислорода при 2-й стадии ишемии не отличалось от значений здоровых людей, при 3-й–4-й стадии превышает уровень нормы на 60 %. Время полного истощения кислорода снижено: при 2-й стадии — на 15 ± 2 %, при 3-й–4-й стадии — на 30 ± 3 %. Время восстановления

ОБЗОРЫ

напряжения кислорода после ишемической пробы в условиях хронической ишемии нижней конечности было выше относительно контрольной группы на 32 ± 2 %. Время прироста напряжения кислорода в условиях хронической ишемии было выше: при 2-й стадии — на 21 %, при 3-й–4-й стадии — на 32 % [23]. Все это отражает степень деструкции и уменьшение капиллярного русла кожи, снижение притока крови, приносящей кислород к тканям конечности, исходно сниженное напряжение кислорода.

В последнее время все большую популярность приобретает функциональная проба «физическая нагрузка». Она проводится в большинстве случаев на беговой дорожке (тедмил-тесте) [7, 24, 29, 40, 49, 54, 66].

Измерения $TcPO_2$ во время и после физической нагрузки объективно демонстрируют возможности периферического русла. У больных с умеренно выраженной перемежающейся хромотой при физической нагрузке наблюдается значительное снижение $TcPO_2$ [66]. Падение $TcPO_2$ при ходьбе со скоростью от 1 до 4 км/час на 20 мм рт. ст. свидетельствует о наличии окклюзии артерий нижних конечностей [7].

По данным Y. Liu [49], у здоровых людей при ходьбе на беговой дорожке $TcPO_2$ значительно не меняется (от 70 до 66 мм рт. ст.), а при велоэргометрии в положении лежа повышается от 58 до 73 мм рт. ст. При обследовании больных с окклюзионными поражениями артерий нижних конечностей наблюдалось снижение $TcPO_2$ с 66 до 33 мм рт. ст. на беговой дорожке, и с 50 до 22 мм рт. ст. при велоэргометрии, что, по всей видимости, было связано с истощением функциональных резервов кровоснабжения пациентов.

Используя тест на беговой дорожке и регистрацию $TcPO_2$, X. Mouren et al., [54] определили, что нафтидрофурил оказывает защитный эффект на индуцированную упражнениями тканевую ишемию, судя по показателям $TcPO_2$ (область под кривой) у пациентов с периферической артериальной окклюзией при 2-й стадии заболевания.

По мнению P. Bouye et al. и P. Abraham et al. [25, 29], показатель $TcPO_2$ на ягодицах при тестировании на беговой дорожке является чувствительным и специфическим показателем при поражениях артериального русла, направленного к гипогастральному кровообращению. Потенциально по нему можно объективно оценивать реакцию на эндоваскулярные и хирургические доступы при поражениях подвздошных артерий.

Кроме того, по выводам P. Abraham et al. [24], наиболее информативным показателем при уточнении сосудистой природы перемежающейся хромоты (или когда нельзя проводить другие неинвазивные методы исследования) является $TcPO_2$ на икроножной мышце при выполнении физических упражнений (тест на беговой дорожке). Наиболее показательным было изменение $TcPO_2$ в области икроножной мышцы, соотношенное со сдвигами $TcPO_2$ грудной клетки во время испытаний на беговой дорожке и после них.

Таким образом, методика измерения $TcPO_2$ в покое и при проведении функциональных проб у больных

с хронической ишемией нижних конечностей является одним из основных неинвазивных способов оценки расстройств микроциркуляции конечности и служит диагностическим тестом, определяющим заживление трофических расстройств, показания к оперативному вмешательству, уровень ампутации и эффективность лечения.

Чрескожное определение напряжения кислорода является информативным и при обследовании больных с синдромом диабетической стопы.

У больных с нейроишемической формой синдрома диабетической стопы без признаков инфекционного поражения стопы $TcPO_2$ составляет от 30 до 48 мм рт. ст. со снижением показателей при проведении ортостатической пробы от 20 до 34 мм рт. ст. [19]. При наличии воспаления (флегмона стопы и др.) происходит повышение показателей $TcPO_2 > 40$ мм рт. ст. В зоне ишемии тканей, развившейся в результате микротромбозов мелких артерий стоп на фоне воспалительных изменений, эти показатели, наоборот, резко снижены (от 0 до 20 мм рт. ст.).

При окклюзии артерий с развитием хронической артериальной недостаточности 4-й стадии и объемом поражения 4-й–5-й стадии по F. W. Wagner сохранение стопы в большинстве случаев нецелесообразно в связи с полной утратой ее на фоне гангреноишемического поражения, что подтверждается показателями полярографии. У таких пациентов показатели $TcPO_2$ были от 1 до 15 мм рт. ст. ($9,2 \pm 1,5$ мм рт. ст.).

При высокой окклюзии с развитием парциальной гангрены стопы перспективы сохранения нижней конечности проблематичны без реваскуляризации конечности. У таких больных в большинстве случаев показатели $TcPO_2$ в покое колебались от 20 до 29 мм рт. ст. со снижением величин от 7 до 21 мм рт. ст. при проведении ортостатической пробы.

В. А. Ступин и др. [19] у больных с синдромом диабетической стопы определили три типа нарушений микроциркуляции: 1 тип (компенсированный) — > 30 мм рт. ст.; 2 тип (субкомпенсированный) — 20–30 мм рт. ст.; 3 тип (декомпенсированный) — < 20 мм рт. ст. Точность полярографии составляла 86,2%, чувствительность — 62,9 %, специфичность — 64,5%. Тип нарушения микроциркуляции, по мнению авторов, определяет алгоритм хирургической тактики у больных с гнойно-некротическими и гангренозно-ишемическими процессами при синдроме диабетической стопы.

Е. Melillo et al. [52] изучали уровни чрескожного кислорода при применении илопроста в случае критической диабетической ишемии конечности. В 52 % случаев лечение привело к положительному эффекту. Успех был почти предопределен, когда $TcPO_2 > 23$ мм рт. ст.

Е. Petrakis, V. Sciacca [59] исследовали $TcPO_2$ в испытательный период стимуляции спинного мозга у пациентов–диабетиков с критической ишемией нижних конечностей. Для выполнения постоянной имплантации стимуляционного устройства надо рассматривать только пациентов–диабетиков с существенным повышением $TcPO_2$ и клиническим

улучшением в течение испытательного периода (первые две недели).

A. Casselli et al. [32], на основании мониторинга чрескожного напряжения кислорода у больных с синдромом диабетической стопы сделали вывод, что после успешной реваскуляризации требуется 3–4 недели для того, чтобы кожная оксигенация улучшилась и достигла оптимальных уровней для заживления ран.

Таким образом, у больных с диабетической стопой чрескожное измерение напряжения кислорода является информативным и помогает определить заживление трофических расстройств, показания к оперативному вмешательству и постоянной имплантации стимуляционного устройства, уровень ампутации и эффективность консервативного и оперативного лечения.

Несмотря на довольно широкое распространение чрескожного мониторинга напряжения кислорода и высокую оценку его информативности, высказываемую различными авторами, в литературе в последнее время много скептических замечаний в адрес этого метода.

P. de Groote et al. [40] изучали сравнительное диагностическое значение лодыжечно-плечевого индекса и $TspO_2$ у пациентов с перемежающейся хромотой 2-й стадии по Leriche, используя тестирование на бегущей дорожке (10 %, 3 км/час). Они пришли к выводу, что у пациентов 2-й стадии по Leriche нет необходимости исследовать $TspO_2$, достаточно определить лодыжечно-плечевой индекс.

Кроме того, при диагностике ишемии конечностей 3–4-й стадий чувствительность $TspO_2$ как изолированного метода относительно невысока и составляет 61 % [9, 69].

В Российских консенсусах 2001 и 2002 гг. [4, 18] отмечено, что по данным этой методики существует довольно широкий промежуток между отсутствием возможностей к репарации ($TspO_2 < 20$ мм рт. ст.) и адекватной перфузией для заживления тканей ($TspO_2 > 40$ мм рт. ст.), к тому же значения $TspO_2$ плохо коррелируют с наступлением ишемических болей покоя, а у пациентов с перемежающейся хромотой также могут быть низкие значения чрескожного напряжения кислорода.

В рекомендациях Российского общества ангиологов и сосудистых хирургов по диагностике и лечению больных с заболеваниями периферических артерий, выпущенных в 2007 г. [3], вообще отсутствуют упоминание и рекомендации по данному методу исследований.

N. Paraskevas et al. [58] отмечали, что при регистрации $TspO_2$ иногда наблюдается значительное наложение значений, получаемых у пациентов с различной степенью ишемии, а их воспроизводимость иногда вызывает сомнение.

J. C. de Graff et al. [38, 39] провели оценку диагностической ценности $TspO_2$ и пальцевого давления при лечении случаев с подозрением на наличие критической ишемии. По мнению авторов, эти методы диагностики не улучшали клинический исход при включении их в общепринятое лечение при подо-

зрении на критическую ишемию конечности. Кроме того, была отмечена плохая воспроизводимость $TspO_2$, в отличие от лодыжечно-плечевого индекса, давления на лодыжке, давления в большом пальце. Особенно в тех случаях, когда определяются низкие показатели. Возникла необходимость повторять определение показателей $TspO_2$.

По мнению S. A. Carter et al. [31], низкие значения $TspO_2$ не обеспечивают существенной диагностической информации, помимо периферического давления или амплитуды пульсовой волны.

W. Kafer et al. [47] определили, что при анализе показателей чрескожного напряжения кислорода, проведенном разными исследователями в постоянной окружающей обстановке, была выявлена неоднородная степень надежности по оценкам одного и нескольких специалистов, что следует принимать во внимание, приступая к лечению.

Анализируя вышеизложенное, можно сделать вывод, что автономное использование $TspO_2$ не всегда оправданно, и его более целесообразно применять в комплексе с другими методами исследования (лодыжечно-плечевой индекс, пальцевое давление и др.) больных с хронической ишемией нижних конечностей.

Чрескожный (транскутанный) мониторинг напряжения углекислого газа ($TspCO_2$)

Если чрескожному напряжению кислорода при хронической ишемии нижних конечностей в научной литературе уделено достаточно много внимания, то исследованию другого компонента тканевого дыхания — углекислого газа — относительно мало [13, 21, 23, 27, 32, 41, 43, 48, 52, 61]. Анализ этого показателя у больных с хронической ишемией нижних конечностей при различных стадиях недостаточности кровообращения до лечения и после различных видов оперативных вмешательств может дать дополнительную информацию об их влиянии на тканевое дыхание, степень изменения метаболизма.

Чрескожное измерение двуокиси углерода ($TspCO_2$) было введено в практику обследования больных в начале 80-х гг. при использовании локально нагреваемых электрохимических датчиков, которые накладывались на поверхность кожи. Такая методология обеспечивала постоянную неинвазивную оценку показателя артериальной крови CO_2 и могла применяться для оценки адекватности вентиляции. Сейчас эта методика широко распространена и часто используется в клинической практике [41].

M. L. Franklin [43] в своих публикациях подчеркивает, что у новорожденных и младенцев чрескожное измерение углекислого газа с применением обычных электрохимических методов может являться средством определения значений $PaCO_2$ (напряжение углекислого газа в артериальной крови). У пациентов с риском нарушения сердечно-сосудистой и легочной функций и у многих взрослых лиц (из-за разной структуры кожи) чрескожный мониторинг не будет точно отражать напряжения газов артериальной крови. Но данный метод может пригодиться при мониторинге тканевого дыхания, особенно у пациентов

ОБЗОРЫ

с периферическим сосудистым заболеванием и при пересадке тканевых лоскутов.

Напряжение углекислого газа в коже конечностей исследуется с помощью уникальных pH-датчиков, базирующихся на принципе Stow-Severinghaus. Датчик для определения углекислого газа состоит из двух частей: 1) pH-электрода, референтного электрода, электролита и полупроницаемой мембраны; 2) тепловой секции, состоящей из двух термисторов для измерения и контроля датчика температуры. Когда датчик установлен на конечности обследуемого, при нагревании 44° молекулы углекислого газа диффундируют сквозь мембрану и вступают в реакцию с электролитом. Эта реакция меняет pH раствора электролита, который изменяет на противоположный заряд напряжение pH и референтного электродов. Поскольку CO_2 — только газ, что может влиять на pH электролита, поэтому существует корреляция между pH и углекислым газом. Эта взаимосвязь выражается уравнением Henderson–Hasselbach [20]:

$$\text{pH} = \text{pKa} + \log \frac{\text{HCO}_3}{0,03 \text{ pCO}_2},$$

где pH — электролита, pKa — константа, характеризующая свойства системы (в данном случае составляет 6,1); HCO_3 — содержание бикарбонатов в ммоль/л; 0,03 — коэффициент соотношения в ммоль·л⁻¹ · мм рт. ст.; pCO_2 — напряжение углекислого газа в мм рт. ст. По изменению напряжения на измеряемом электроде судят о напряжении углекислого газа в верхних слоях кожи.

Датчики чрескожного определения напряжения углекислого газа (TspCO_2) существуют в виде одиночного датчика Pco_2 , комбинированного датчика Pco_2/Po_2 (TCM-3 Radiometr, Дания; Novamatrix Medical Systems, США), а позднее появился комбинированный датчик $\text{Pco}_2/\text{Spo}_2$ (TOSCA, Linde Medical Sensor, Basel, Switzerland).

Чрескожное напряжение углекислого газа у здоровых взрослых людей в вертельной и ретровертельной областях составляет $36,3 \pm 5,1$ мм рт. ст. [36], средней трети голени — $43,0 \pm 1,0$ мм рт. ст., стопы — $42,0 \pm 2,4$ — $43,7 \pm 3,7$ мм рт. ст. [21, 23, 68].

У взрослых людей (в возрасте от 25 до 70 лет) в покое напряжение углекислого газа в артериальной крови (PaCO_2) составляет от 32 до 45 мм рт. ст. (38,5 мм рт. ст.). Напряжение углекислого газа в артериальной крови, поступающей в тканевые капилляры, приближается к 40 мм рт. ст. В оттекающей от тканей крови напряжение углекислого газа увеличивается до 46 мм рт. ст. [20]. Данные чрескожного определения напряжения углекислого газа взрослых людей находятся в этом же диапазоне значений.

S. V. Rithalia et al. [64] также определили, что у здоровых взрослых субъектов взаимосвязь между TspCO_2 и PaCO_2 носит линейный характер, и коэффициент корреляции составлял 0,92. Значения TspCO_2 при модифицированной калибровке электродов не отличаются в значительной степени от PaCO_2 . Данный факт был подтвержден и J. P. Janssen et al. [46] при проведении исследований у взрослых лиц пожилого и старческого возраста. В большей степени пока-

затели соответствуют друг другу, когда измерения регистрируются в области грудной клетки [55].

Анализируя вышеизложенное, можно сделать вывод, что чрескожное напряжение углекислого газа у здоровых взрослых людей соответствует напряжению углекислого газа артериальной крови.

Изучению напряжения углекислого газа у больных с хронической ишемией нижних конечностей уделено относительно мало внимания. S. G. Lalka et al. [48] только упоминают о регистрации TspCO_2 в коже стопы, грудной клетки, уделяя основное внимание анализу TspO_2 . V. Petruzzellis et al., [61] отмечали, что у больных с болезнью Бюргера напряжение TspCO_2 — больше, чем у здоровых людей. Е. Г. Микульская и др. [13] сообщают об использовании регистрации кроме напряжения кислорода и TspCO_2 . По данным этих авторов, у больных с критической ишемией при напряжении TspO_2 — 5,3 мм рт. ст., TspCO_2 составляет $60 \pm 6,5$ мм рт. ст. (от 46 до 74 мм рт. ст.).

В. И. Шевцов и др. [21] определили, что с углублением патологического процесса у больных с облитерирующим атеросклерозом сосудов нижних конечностей расширяется зона нарушения тканевого дыхания кожных покровов, снижается напряжение кислорода и увеличивается напряжение углекислого газа. У больных 2-й стадии недостаточности кровоснабжения: в коже стопы TspO_2 — 43 ± 2 мм рт. ст., TspCO_2 — 55 ± 3 ; при 3–4-й стадии: TspO_2 — 15 ± 3 мм рт. ст., TspCO_2 — 83 ± 7 мм рт. ст. В группе больных 3–4 стадии в 50 % случаев напряжение кислорода соответствовало нулевому уровню, напряжение углекислого газа было высоким и составляло в среднем 89 ± 12 мм рт. ст. (выше на 102 % относительно нормативных значений).

По наблюдениям I. Sugimoto et al. [68], у больных, имеющих значения TspCO_2 в коже стопы 100 мм рт. ст. и выше, можно констатировать наличие критической ишемии нижней конечности.

G. M. Andreozzi et al. [27] показали, что при воздействии локальной ишемии в течение 3-х минут (ишемическая проба) максимальное повышение TspCO_2 относительно покоя увеличивается с углублением тяжести заболевания с 2А до 4-й стадии по Fontaine, прирост увеличивался почти в 2 раза (с 4,61 до 8,66 мм рт. ст.). Эти авторы считают, что определение прироста TspCO_2 под действием локальной ишемии может являться очень важным параметром оценки периферического артериального заболевания и в целом тканевой сопротивляемости ишемии.

По данным другого автора [23], при проведении ишемической пробы прирост TspCO_2 в постишемический период у пациентов с хронической ишемией конечностей 2-й и 3-й стадий (по А. В. Покровскому) проявляется значительно позже (время прироста на 78 % больше, чем в норме), и его процент выше (19 и 32 % соответственно), чем у здоровых людей.

Кроме того, анализ литературы показал, что ряд авторов отмечают достаточные прогностические возможности TspCO_2 при консервативном лечении, васкуляризации, ампутации больных с хронической ишемией конечностей и диабетической стопой.

Е. Melillo et al. [52] изучали уровни чрескожного кислорода и углекислого газа при применении илопроста в случае критической диабетической ишемии конечности. В 52 % случаев лечение привело к успеху. Неудачи лечения возрастали при повышении TspCO_2 на базисном уровне и понижении тертилей TspO_2 . Прогнозы неудач, основанные на повышенных показателях TspCO_2 (>53 мм рт. ст.) были эффективнее, чем основанные на пониженных показателях TspO_2 . Повышение показателя TspCO_2 эффективно прогнозировало неудачу, а высокое TspO_2 оказалось подходящим прогностическим показателем успешного применения илопроста, указывая, тем самым, что их сочетанное применение может обеспечить более хорошее прогностическое распределение и улучшить подход к лечению диабетической хронической критической ишемии конечности.

По мнению А. Caselli et al. [32], после успешной реваскуляризации требуется 3–4 недели для того, чтобы кожная оксигенация улучшилась и достигла оптимальных уровней для заживления ран. Сопутствующее снижение напряжения углекислого газа TspCO_2 наблюдалось сразу же после реваскуляризации, которое достигало наибольших низких уровней через 3 недели. При неуспешной реваскуляризации было зарегистрировано незначительное улучшение TspO_2 сразу после операции, но при этом оно оставалось стабильным на всем протяжении наблюдения, тогда как уровни TspCO_2 не менялись. Таким образом, мониторинг TspCO_2 может оказаться более подходящим для идентификации негативного исхода процедуры реваскуляризации.

Е. Melillo et al. [51] показали, что у больных с неподдающейся реконструкции критической ишемией нижних конечностей в положении лежа на спине снижение TspO_2 и повышение TspCO_2 является значимым прогностическим фактором риска большой ампутации. Положительный эффект фармакологической терапии, наблюдаемый в первые 6 месяцев, исчезает в течение следующих 6 месяцев. Продолжительный мониторинг газов по приборам обеспечивает постоянную оценку метаболических параметров, тем самым давая возможность сохранить конечность при проведении дополнительной фармтерапии.

И. О. Липатова и др. [12] определили, что у больных облитерирующим атеросклерозом артерий нижних конечностей при анализе средних исходных данных чрескожного напряжения углекислого газа тыла стопы, середины голени и нижней трети бедра

и аналогичных данных на этих же уровнях после проведения сеансов лазерной терапии произошло заметное снижение показателей только на уровне тыла стопы. Несмотря на относительно умеренное снижение этих показателей, можно, тем не менее, говорить об улучшении или о выраженной тенденции к улучшению микроциркуляции мягких тканей тыла стопы по данным динамики углекислого газа в результате применения лазерной терапии.

Анализируя современное состояние вопроса о диагностических возможностях чрескожного мониторинга напряжения углекислого газа, Р. Eberhard [41] сформулировал текущие и будущие направления развития данного метода исследования. В течение последних 20 лет постоянно разрабатывалась методология, которая совершенствовала систему TspCO_2 , делая ее более простой и надежной для применения в клинической практике: уменьшалась величина датчика (диаметр — 15 мм, высота — 8 мм), устанавливалась более редкая смена мембран (каждые 2 недели) и калибровка (два раза в день); разрабатывался датчик, готовый к применению при подсоединении к монитору; датчик с более низкой температурой (42°C); сокращалось время артериализации (3 минуты); повышалась надежность показателей вследствие защиты мембраны. В применяемых в настоящее время датчиках TspCO_2 все еще требуется систематически менять мембрану и проводить калибровку. Одним из путей преодоления необходимости этих процедур является применение особенных средств регистрации. Разработаны два метода с применением оптического поглощения в свете, почти близком к инфракрасному в бесконечно малой волне волновода, интегрированной на поверхности датчика, или в выбранной микрооптической ячейке. На такой датчик не оказывает влияния смещение на несколько дней, и время его реакции составляет <1 минуты.

Таким образом, чрескожный мониторинг углекислого газа информативен при оценке результатов консервативного лечения, прогнозирования результата васкуляризации, ампутации у больных с хронической ишемией нижних конечностей. Однако некоторые аспекты его применения требуют дальнейшей разработки. Использование этого показателя в сочетании с чрескожным мониторингом кислорода может улучшить систему диагностики и прогнозирования при лечении больных с хронической ишемией нижних конечностей и компенсировать недостатки чрескожного мониторинга напряжения кислорода.

ОБЗОРЫ

Литература

1. Беневоленский, Д. С. Транскутанная оксиметрия, как метод оценки состояния местного кровоснабжения / Д. С. Беневоленский // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. — 2007. — Т. 6. — № 1 (21). — С. 30–31.
2. Гусак, В. К. Возможности полярографии в прогнозировании эффекта реконструктивной операции у больных с тяжелой ишемией нижних конечностей / В. К. Гусак [и др.] // Вестник хирургии. — 1993. — № 5–6. — С. 69–70.
3. Диагностика и лечение больных с заболеваниями периферических артерий : Рекомендации Российского общества ангиологов и сосудистых хирургов. — М., 2007. — 165 с.
4. Диагностика и лечение пациентов с критической ишемией нижних конечностей / Российский консенсус. — М., 2002. — 40 с.
5. Золотаревский, В. Я. Полярографическое определение напряжения кислорода в тканях конечности при облитерирующих заболеваниях артерий для выбора уровня ампутаций / В. Я. Золотаревский // Кровообращение. — 1983. — Т. 16. — № 4. — С. 39.
6. Иванов, С. В. Диагностика окклюзии магистральных артерий нижних конечностей с использованием чрескожного измерения напряжения кислорода / С. В. Иванов, В. Э. Кудряшов, Ю. В. Беленький // Хирургия. — 1990. — № 5. — С. 76–79.
7. Иванов, С. В. Оценка артериальной недостаточности нижних конечностей по показателям транспорта кислорода в тредмил-тесте / С. В. Иванов, В. Э. Кудряшов, Ю. В. Беленький // Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. — 1992. — № 5–6. — С. 29.
8. Кабулия, Г. Б. Определение уровня ампутации конечности у больных окклюзионными заболеваниями периферических артерий методом чрескожного измерения напряжения кислорода / Г. Б. Кабулия [и др.] // Хирургия. — 1990. — № 5. — С. 72–75.
9. Клиническая ангиология : руководство : в 2 т. Т. 1 / под ред. А. В. Покровского. — М. : Медицина, 2004. — 808 с.
10. Клэйес, А. Исследование микроциркуляции у больных с критической ишемией / А. Клэйес, К. Ктенидис, С. Хорш // Ангиология и сосудистая хирургия. — 1995. — № 2. — С. 59.
11. Кушинир, Р. Я. Применение метода полярографии для оценки состояния периферического кровообращения у больных с облитерирующими заболеваниями артерий нижних конечностей / Р. Я. Кушинир, Ю. М. Полоус // Клин. хирургия. — 1988. — № 7. — С. 52–54.
12. Липатова, И. О. Низкоинтенсивное лазерное излучение в комплексном лечении облитерирующего атеросклероза нижних конечностей / И. О. Липатова [и др.] // Хирургия. — 2003. — № 4. — С. 21–26.
13. Миккульская, Е. Г. Микроциркуляторные критерии прогнозирования результатов восстановительных операций на артериях у больных с тяжелой ишемией нижних конечностей / Е. Г. Миккульская [и др.] // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. — 2007. — № 1 (21). — С. 102–103.
14. Миланов, Н. О. Значение полярографии в контроле за жизнеспособностью свободных составных лоскутов / Н. О. Миланов, Н. И. Антохий, З. М. Гайнуллин // Хирургия. — 1989. — № 8. — С. 51–55.
15. Национальные стандарты оказания помощи больным сахарным диабетом / Минздрав РФ. — М., 2002. — 30 с.
16. Покровский, А. В. Определение степени нарушения региональной микроциркуляции нижних конечностей / А. В. Покровский, А. Н. Чупин // Методология флоуметрии. — 1997. — Вып. 1. — С. 51–54.
17. Пшеничный, В. Н. Гемодинамические аспекты в прогнозировании исхода реваскуляризации у больных с тяжелой ишемией нижних конечностей : автореф. дис.... канд. мед. наук. — Киев, 1992. — 16 с.
18. Рекомендуемые стандарты для оценки результатов лечения пациентов с хронической ишемией нижних конечностей / Российский консенсус. — М., 2001. — 29 с.
19. Ступин, В. А. Оценка микроциркуляторных нарушений нижних конечностей и ее влияние на выбор хирургической тактики у больных с синдромом диабетической стопы / В. А. Ступин [и др.] // Рус. мед. журн. — 2008. — Т. 16. — № 14. — С. 1–6.
20. Тевс, Г. Газы крови и кислотно-щелочное равновесие / Г. Тевс // Физиология человека. Т. 3 / под ред. Р. Шмидта и Г. Тевса. — М. : Мир, 1986. — С. 241–289.
21. Шевцов, В. И. Чрескожное определение напряжения кислорода и углекислого газа у больных с облитерирующим атеросклерозом сосудов нижних конечностей / В. И. Шевцов, Е. Н. Щурова, В. А. Щуров // Вестник хирургии. — 1999. — Т. 158. — № 3. — С. 30–33.
22. Шумейкер, В. Предсказание тяжелой травмы с помощью неинвазивного мониторинга / В. Шумейкер [и др.] // Анестезиол. и реаниматол. — 2003. — № 6. — С. 8–13.
23. Щурова, Е. Н. Динамика чрескожного напряжения кислорода и углекислого газа при проведении ишемической пробы в норме и в условиях хронической ишемии конечности / Е. Н. Щурова // Физиология человека. — 2000. — Т. 26. — № 3. — С. 79–83.
24. Abraham, P. Transcutaneous oxygen pressure measurements (TcPO₂) at ankle during exercise in arterial claudication / P. Abraham [et al] // Int. Angiol. — 2005. — № 24 (1). — P. 80–88.
25. Abraham, P. Transcutaneous oxygen pressure measurements on the buttocks during exercise to detect proximal arterial ischemia : comparison with arteriography / P. Abraham [et al] // Circulation. — 2003. — № 107 (14). — P. 1896–1900.
26. Allegra, C. Posturally induced microvascular changes and postocclusive hyperemic response in patients with lower limb ischaemia / C. Allegra, A. Carlizza, G. Pollari // Int. J. Microcir. Clin. and Exp. — 1992. — Suppl. 11. — № 1. — P. 28.
27. Andreozzi, G. M. Transcutaneous PCO₂ level as an index of tissue resistance to ischemia / G. M. Andreozzi [et al] // Angiology. — 1995. — № 46 (12). — P. 1097–1102.
28. Bongard, O. Oxygen inhalation improves nutritional skin blood flow in patients with severe peripheral arterial occlusive disease / O. Bongard, H. Bounameaux, B. Fagrell // Int. J. Microcir. Clin. and Exp. — 1992. — Suppl. 11. — № 1. — P. 29.
29. Bouye, P. Reproducibility of proximal and distal transcutaneous oxygen pressure measurements during exercise in stage 2 arterial claudication / P. Bouye [et al] // Int. Angiol. — 2004. — № 23 (2). — P. 114–121.
30. Boyko, E. J. Tissue oxygenation and skin blood flow in the diabetic foot : responses to cutaneous warming / E. J. Boyko, J. H. Ahroni, V. L. Stensel // Foot Ankle Int. — 2001. — № 22 (9). — P. 711–714.
31. Carter, S. A. The relationship of the transcutaneous oxygen tension, pulse waves and systolic pressures to the risk

- for limb amputation in patients with peripheral arterial disease and skin ulcers or gangrene / S. A. Carter, R. B. Tate // *Int. Angiol.* — 2006. — № 25 (1). — P. 67–72.
32. Caselli, A. Transcutaneous oxygen tension monitoring after successful revascularization in diabetic patients with ischaemic ulcers / A. Caselli [et al] // *Diabet. Med.* — 2005. — № 22 (4). — P. 460–465.
33. Caspary, L. Variability of TcpO₂ — measurements at 370 and 440 C in patients with claudication in consideration of provocation test / L. Caspary, A. Creutzig, R. Alexander // *Vasa.* — 1993. — Vol. 22. — № 2. — P. 129.
34. Chomard, D. Criteria predictive of limb viability at 1 year in patients with chronic severe ischemia-TcpO₂ and demographic parameters / D. Chomard [et al] // *Angiology.* — 2000. — № 51 (9). — P. 765–776.
35. Clark, L. C. The control and monitoring of blood and tissue oxygen / L. C. Clark // *Trans. Am. Soc. Anat. Int. Org.* — 1956. — Vol. 2. — P. 41–48.
36. Colin, D. Comparison of 90 degrees and 30 degrees laterally inclined positions in the prevention of pressure ulcers using transcutaneous oxygen and carbon dioxide pressures / D. Colin [et al] // *Adv. Wound. Care.* — 1996. — № 9 (3). — P. 35–38.
37. Cyba-Altunbay, S. Transkutane Sauerstoffpartialdruckmessung zur praoperativen Bestimmung der optimalen Amputationshohe im Endstadium der arteriellen Verschlusskrankheit / S. Cyba-Altunbay, J. Vollmar, H. Kogel // *Chir. Prax.* — 1986. — Vol. 36. — № 4. — P. 667–680.
38. De Graaff, J. C. Evaluation of toe pressure and transcutaneous oxygen measurements in management of chronic critical leg ischemia : a diagnostic randomized clinical trial / J. C. De Graaff [et al] // *J. Vasc. Surg.* — 2003. — № 38 (3). — P. 528–534.
39. De Graaff, J. C. Interobserver and intraobserver reproducibility of peripheral blood and oxygen pressures measurements in the assessment of lower extremity arterial disease / J. C. De Graaff [et al] // *J. Vasc. Surg.* — 2001. — № 33 (5). — P. 1033–1040.
40. de Groote, P. Comparative diagnostic value of ankle-to-brachial index and transcutaneous oxygen tension at rest and after exercise in patients with intermittent claudication / P. de Groote [et al] // *Angiology.* — 1995. — № 46 (2). — P. 115–122.
41. Eberhard, P. The design, use, and results of transcutaneous carbon dioxide analysis : current and future directions / P. Eberhard // *Anesth. Analg.* — 2007. — № 105 (6 Suppl.). — P. 48–52.
42. Forconi, S. TcpO₂ at different temperatures (from 370 C to 440 C) in studying limb circulation of healthy subjects and of patients suffering from peripheral arterial disease / S. Forconi [et al] // *Int. J. Microcir. Clin. and Exp.* — 1992. — Suppl. 11. — № 1. — P. 50.
43. Franklin, M. L. Transcutaneous measurement of partial pressure of oxygen and carbon dioxide / M. L. Franklin // *Respir. Care Clin. N. Am.* — 1995. — № 1 (1). — P. 119–131.
44. Franzeck, U. K. Transcutaneous pO₂ measurements in health and peripheral arterial occlusive disease / U. K. Franzeck [et al.] // *Surgery.* — 1982. — № 9 (12). — P. 156–163.
45. Got, I. Transcutaneous oxygen pressure (TcpO₂) : advantages and limitations / I. Got // *Diabetes Metab.* — 1998. — № 24 (4). — P. 379–384.
46. Janssen, J. P. Non-invasive (transcutaneous) monitoring of PCO₂ (TcpCO₂) in older adult / J. P. Janssen [et al] // *Gerontology.* — 2005. — № 51 (3). — P. 174–178.
47. Kafer, W. Reliability of transcutaneous measurement of oxygen tension on the lower leg / W. Kafer [et al] // *Orthop. Ihre Grenzgeb.* — 2005. — № 143 (1). — P. 112–116.
48. Lalka, S. G. Transcutaneous oxygen and carbon dioxide pressure monitoring to determine severity of limb ischemia and to predict surgical outcome / S. G. Lalka [et al] // *J. Vasc. Surg.* — 1988. — Vol. 7. — № 4. — P. 507–514.
49. Liu, Y. Transcutaneous oxygen tension and doppler ankle pressure during upper and lower body exercise in patients with peripheral arterial occlusive disease / Y. Liu, J. M. Steinacker, M. Stauch // *Angiology.* — 1995. — № 46 (8). — P. 689–698.
50. Matsen, F. T. Transcutaneous oxygen tension as predictor of wound healing / F. T. Matsen [et al] // *J. Rehabil. Res. and Dev.* — 1986. — № 1. — P. 234–235.
51. Melillo, E. Is transcutaneous oxygen and carbon dioxide monitoring indispensable in short-and long-term therapeutic management of non-reconstructable lower critical limb ischemia? / E. Melillo [et al] // *Minerva Cardioangiol.* — 2006. — № 54 (4). — P. 481–498.
52. Melillo, E. Transcutaneous oxygen and carbon dioxide levels with iloprost administration in diabetic critical limb ischemia / E. Melillo [et al] // *Vasc. Endovascular. Surg.* — 2006. — № 40 (4). — P. 303–311.
53. Moosa, H. Transcutaneous oxygen measurements in lower extremity ischemia. Effects of position, oxygen inhalation, and arterial reconstruction / H. Moosa [et al] // *Surgery.* 1988. — Vol. 103. — № 2. — P. 193.
54. Mouren, X. The effect of naftidrofuryl on transcutaneous oxygen tension during a treadmill test in patients with peripheral arterial occlusive disease / X. Mouren [et al] // *Vasc. Med.* — 1998. — № 3(1). — P. 9–14.
55. Nishiyama, T. Comparison of the transcutaneous oxygen and carbon dioxide tension in different electrode locations during general anaesthesia / T. Nishiyama, S. Nakamura, K. Yamashita // *Eur. J. Anaesthesiol.* — 2006. — № 23(12). — P. 1049–1054.
56. Ogrin, R. Age-related changes in microvascular blood flow and transcutaneous oxygen tension under Basal and stimulated conditions / R. Ogrin, P. Darzins, Z. Khalil // *J. Gerontol. A. Biol. Sci. Med. Sci.* — 2005. — № 60 (2). — P. 200–206.
57. Padberg, F. T. Transcutaneous oxygen (TcpO₂) estimates probability of healing in the ischemic extremity / F. T. Padberg [et al] // *J. Surg. Res.* — 1996. — № 60 (2). — P. 365–369.
58. Paraskevas, N. «Pole test» measurements in critical leg ischaemia / N. Paraskevas [et al] // *Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg.* — 2006. — № 31 (1). — P. 253–257.
59. Petrakis, E. Prospective study of transcutaneous oxygen tension (TcpO₂) measurements in the testing period of spinal cord stimulation in diabetic patients with critical lower limb ischaemia / E. Petrakis, V. Sciacca // *Int. Angiol.* — 2000. — № 19 (1). — P. 18–25.
60. Petrakis, E. Spinal cord stimulation in diabetic lower limb critical ischemia : transcutaneous oxygen measurement as predictor for treatment success / E. Petrakis, V. Sciacca // *Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg.* — 2000. — № 19 (6). — P. 587–592.
61. Petruzzellis, V. Osservazioni microcircolatorie in 3 casi di morbo di Burger / V. Petruzzellis [et al] // *G. ital. angiol.* — 1996. — № 1. — P. 29–35.
62. Rich, K. Effects of leg and body position on transcutaneous oxygen measurements in health subjects and subjects with peripheral artery disease after lower-extremity arterial revascularization : a pilot study / K. Rich // *J. Vasc.*

ОБЗОРЫ

Nurs. — 2002. — № 20 (4). — P. 125–135.

63. Rich, K. *Transcutaneous oxygen measurements : implication for nursing.* / K. Rich // *J. Vasc. Nurs.* — 2001. — № 19 (2). — P. 55–59.

64. Rithalia, S. V. *Comparison of transcutaneous oxygen and carbon dioxide monitors in normal adults and critically ill patients* / S. V. Rithalia, P. Farrow, B. R. Doran // *Intensive Crit. Care Nurs.* — 1992. — № 8 (1). — P. 40–46.

65. Rooke, T. *TcpO₂ in non-invasive vascular medicine* / T. Rooke // *Blood Gas News.* — 1998. — № 7. — P. 2–23.

66. Rosfors, S. *Transcutaneous oxygen pressure measurements patients with intermittent claudication* / S. Rosfors, F. Celsing, M. Eriksson // *Clin. Physiol.* — 1994. — № 4. — P. 385–391.

67. Stalc, M. *The usefulness of transcutaneous oximetry in assessing the success of percutaneous transluminal angioplasty* / M. Stalc, P. Poredos // *Eur. J. Vasc. Endovasc.*

Surg. — 2002. — № 24 (6). — P. 528–532.

68. Sugimoto, I. *Transcutaneous carbon dioxide tension for the evaluation of limb ischemia* / I. Sugimoto [et al] // *Surg. Today.* — 2009. — № 39 (1). — P. 9–13.

69. Ubbink, D. Th. *The value of non-invasive techniques for the assessment of critical limb ischaemia* / D. Th. Ubbink [et al] // *Eur. J. Vasc. Surg.* — 1997. — Vol. 9. — P. 197–203.

70. Ubbink, D. Th. *The usefulness of capillary microscopy, transcutaneous oximetry and laser Doppler fluxmetry to distinguish different stages of lower limb ischaemia* / D. T. Ubbink [et al] // *Int. J. Microcir. Clin. and Exp.* — 1992. — Suppl. 11. — № 1. — P. 39.

71. Wutschert, R. *Utilite clinique de la mesure transcutanee de la pression partielle d oxygene* / R. Wutschert, O. Bongard, H. Bounameaux // *STV : Sang, thrombose, vaisseaux.* — 1998. — № 9. — P. 581–585.