

АНАЛИЗ ГАЗОВ  
АРТЕРИАЛЬНОЙ КРОВИ  
ПОНЯТНЫМ ЯЗЫКОМ

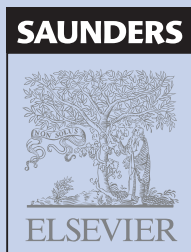
# ARTERIAL BLOOD GASES MADE EASY

**Iain A M Hennessey** MBChB (Hons) BSc (Hons) MRCS

Senior House Officer, Neonatal Intensive Care  
Royal United Hospital, Bath, UK

**Alan G Japp** MBChB (Hons) BSc (Hons) MRCP

Clinical Research Fellow in Cardiology  
University of Edinburgh, UK



# АНАЛИЗ ГАЗОВ АРТЕРИАЛЬНОЙ КРОВИ ПОНЯТНЫМ ЯЗЫКОМ

**Айан А.М. Хеннеси**

**Алан Дж. Джапп**

Перевод с английского  
под редакцией

**В.Л. Кассиля**

практическая медицина

Москва 2009

УДК 612.127  
ББК 53.4  
А64

**А64 Анализ газов артериальной крови понятным языком** / Айан А.М. Хеннеси, Алан Дж. Джапп; пер. с англ. под ред. В.Л. Кассиля. — М.: Практическая медицина, 2009. — 140 с.: ил.

ISBN 978-5-98811-126-9

В книге рассматриваются основные понятия газообмена в норме и патологии. Отдельные разделы посвящены кислотно-основному состоянию и его нарушениям, технике взятия проб крови. Оригинальные схемы и рисунки позволяют читателю быстро усвоить материал, разобраться в тонкостях анализа газов артериальной крови и его клинической интерпретации. Вторая часть книги содержит клинические примеры с вопросами и ответами.

Для студентов медицинских вузов и врачей всех специальностей.

**УДК 612.127**  
**ББК 53.4**

Включение рекламного модуля на заднюю сторону обложки данной книги не является гарантией качества или продвижением данного продукта либо услуг со стороны издательства «Практическая медицина» и Elsevier Ltd. Это также относится к любым утверждениям и заявлениям со стороны рекламодателей данных продуктов и услуг.

Данное издание печатается по контракту с издательством Elsevier Ltd.

ISBN: 978-5-98811-126-9 (рус.)  
ISBN: 978-0-443-10414-5 (англ.)

© Elsevier Ltd., 2007. Все права защищены.  
© Перевод и оформление издательства практическая медицина, 2009.

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Если вы нашли время заглянуть в эту книгу, то, наверняка, считаете, что анализ газов артериальной крови очень важен, но не так уж прост для интерпретации.

Мы полностью согласны с первым утверждением: это исследование имеет кардинальное значение в диагностике и лечении различных неотложных состояний, в том числе хирургических. Без правильной интерпретации результатов анализа газов крови современной клинической медицине не обойтись.

Со вторым же утверждением, как мы надеемся, эта книга поможет вам не согласиться. Мы постарались охватить ключевые концепции, обратить внимание на полезные практические аспекты анализа газов крови, избегая лишних подробностей. Мы верим, что студентам, молодым врачам и медсестрам принесет пользу это ясное, краткое руководство по проведению анализа газов крови и интерпретации его результатов.

Айан А.М. Хеннесси  
Алан Дж. Джапп

# БЛАГОДАРНОСТИ

Мы признательны д-ру Дж. К. Бэйли за советы, предложения и конструктивную критику. Рекомендуем посетить его веб-сайт, посвященный анализу газов крови: [www.altitudephysiology.org](http://www.altitudephysiology.org)<sup>1</sup>. Мы благодарны д-ру Джеффу Гэнделу за помощь и советы, а также всем, кто предложил свои идеи, комментарии и помощь.

Наконец, мы благодарим Лоуренс Хантер, Хелен Ленг и Нэнси Арнотт за неизменную поддержку и терпение.

---

<sup>1</sup> Существует и другой полезный сайт на эту тему: [www.bloodgas.org](http://www.bloodgas.org) (прим. пер.).

# СОДЕРЖАНИЕ

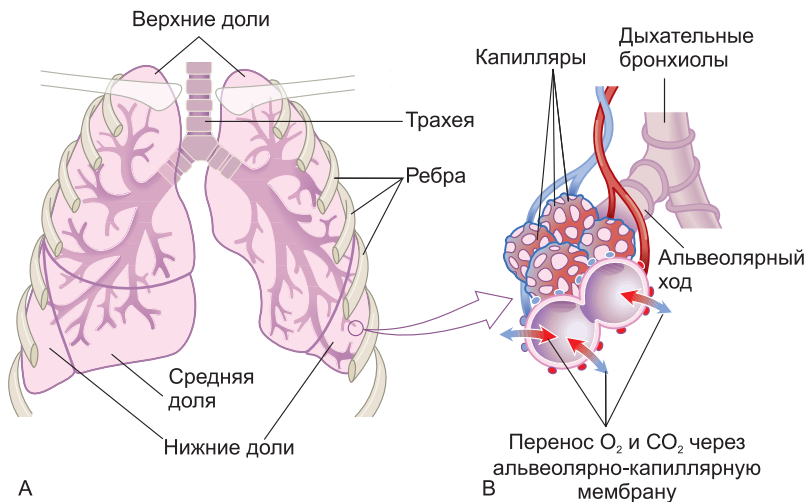
|  |           |
|--|-----------|
| <i>Предисловие</i>                                       | v         |
| <i>Благодарности</i>                                     | vi        |
| <b>Часть 1 Основы анализа газов крови</b>                | <b>1</b>  |
| 1.1 Введение   | 3         |
| 1.2 Газообмен в легких: основы                           | 4         |
| 1.3 Нарушения газообмена                                 | 18        |
| 1.4 Кисотно-основное состояние                           | 26        |
| 1.5 Нарушения кислотно-основного состояния               | 36        |
| 1.6 Техника взятия проб крови                            | 42        |
| 1.7 Когда и зачем нужен анализ газов крови?              | 48        |
| 1.8 Нормальные результаты анализа газов крови            | 50        |
| 1.9 Интерпретация результатов анализа<br>понятным языком | 52        |
| Приложение   | 56        |
| <b>Часть 2 Анализ газов крови в клинической практике</b> | <b>57</b> |
| Клинические примеры                                      | 58        |
| Ответы   | 109       |

# ГАЗООБМЕН В ЛЕГКИХ: ОСНОВЫ

Наши клетки используют кислород ( $O_2$ ) для выработки энергии и продуцируют углекислый газ — двуокись углерода ( $CO_2$ ) в качестве отходов. Кровь снабжает клетки необходимым  $O_2$  и удаляет лишний  $CO_2$ . Этот процесс зависит от способности наших легких обогащать кровь  $O_2$  и избавляться от  $CO_2$ .

Под *газообменом в легких* понимают перенос  $O_2$  из воздуха в кровь (оксигенация) и перенос  $CO_2$  из крови в атмосферу (удаление  $CO_2$ ).

Газообмен происходит между маленькими воздушными мешочками, называемыми *альвеолами*, и кровеносными сосудами, называемыми *капиллярами*. Поскольку и те, и другие имеют очень тонкие стенки, тесно прижатые друг к другу (альвеолярно-капиллярная мембрана),  $CO_2$  и  $O_2$  способны перемещаться (*диффундировать*) между ними (рис. 1).



**Рисунок 1** Анатомия дыхательной системы

## ГАЗООБМЕН В ЛЕГКИХ: ПАРЦИАЛЬНЫЕ ДАВЛЕНИЯ

Анализ газов крови помогает нам оценить эффективность газообмена, показывая величины *парциальных давлений*  $O_2$  и  $CO_2$  в артериальной крови —  $PaO_2$  и  $PaCO_2$ .

Парциальное давление описывает вклад отдельного газа газовой смеси (такой, как воздух) в общее давление. Когда газ растворяется в жидкости (например, в крови), растворенное количество зависит от парциального давления.

### Note

$PO_2$  = парциальное давление  $O_2$

$PaO_2$  = парциальное давление  $O_2$  в артериальной крови

Газы перемещаются из области высокого парциального давления в область низкого парциального давления. По одну сторону альвеолярно-капиллярной мембраны в воздухе альвеол  $PO_2$  выше, а  $PCO_2$  ниже, чем в капиллярной крови. Поэтому молекулы  $O_2$  переходят из альвеол в кровь, а молекулы  $CO_2$  — из крови в альвеолы, пока парциальные давления не сравняются.

### Заметка по ... давлению газов

На уровне моря атмосферное давление (общее давление газов в атмосфере) = 101 кПа<sup>1</sup> или 760 мм рт. ст.

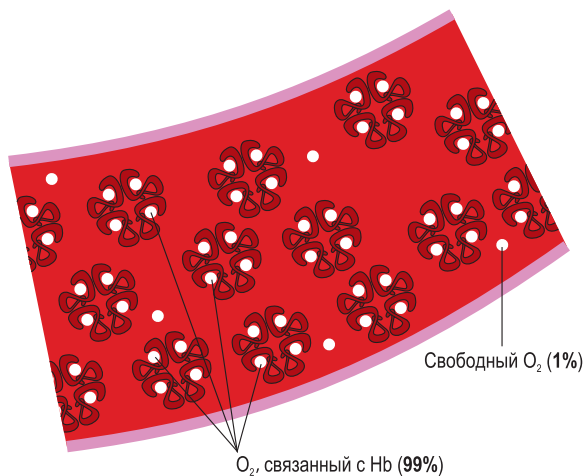
Содержание  $O_2$  в воздухе — 21%, поэтому парциальное давление  $O_2$  в воздухе

= 21% от атмосферного давления

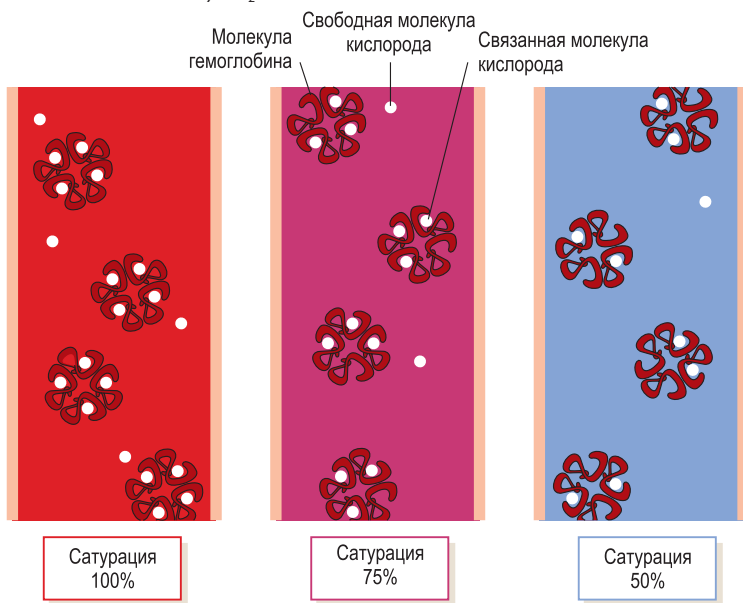
= 21 кПа или 160 мм рт. ст.

На долю  $CO_2$  приходится лишь очень небольшая часть воздуха, поэтому парциальное давление  $CO_2$  во вдыхаемом воздухе незначительно

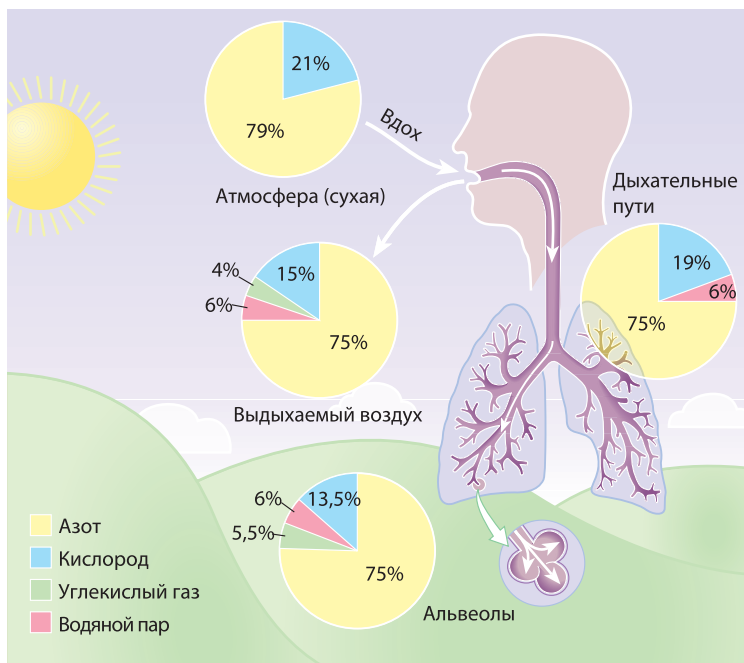
<sup>1</sup> 1 кПа = 7,5 мм рт. ст. (прим. ред.)



**Рисунок 3** Относительное содержание в крови свободных и связанных с гемоглобином молекул  $O_2$



**Рисунок 4** Сатурация гемоглобина кислородом



**Рисунок 6** Состав вдыхаемого и выдыхаемого воздуха

### Важно!

Как оксигенация, так и удаление  $\text{CO}_2$  зависит от альвеолярной вентиляции: нарушение вентиляции приводит к падению  $P_{\text{aO}_2}$  и подъему  $P_{\text{aCO}_2}$ .

## Неравномерность вентиляционно-перфузионного отношения и шунтирование

Не вся кровь, протекающая через легкие, попадает капилляры, соприкасающиеся с хорошо вентилируемыми альвеолами, и не все хорошо вентилируемые альвеолы получают достаточно крови, особенно при наличии легочных заболеваний. Эта проблема известна, как неравномерность вентиляционно-перфузионного отношения ( $V/Q$ ).

Представьте, что альвеолы в какой-то области легких плохо вентилируются (например, из-за спадения альвеол или уплотнения). Кровь, пройдя через капилляры плохо вентилируемых альвеол, возвращается в артериальный кровоток, имея меньше  $O_2$  и больше  $CO_2$ , чем в норме. Это известно, как *шунтирование*<sup>1</sup>.

Теперь гипервентиляция усиливает обмен воздуха в оставшихся «хороших» альвеолах. Это позволяет «выдохнуть» больше  $CO_2$ , и таким образом кровь, протекающая через эти альвеолы, отдает больше  $CO_2$ . Снижение  $CO_2$  в такой крови компенсирует более высокое содержание  $CO_2$  в шунтированной крови, и нормализует  $PaCO_2$ .

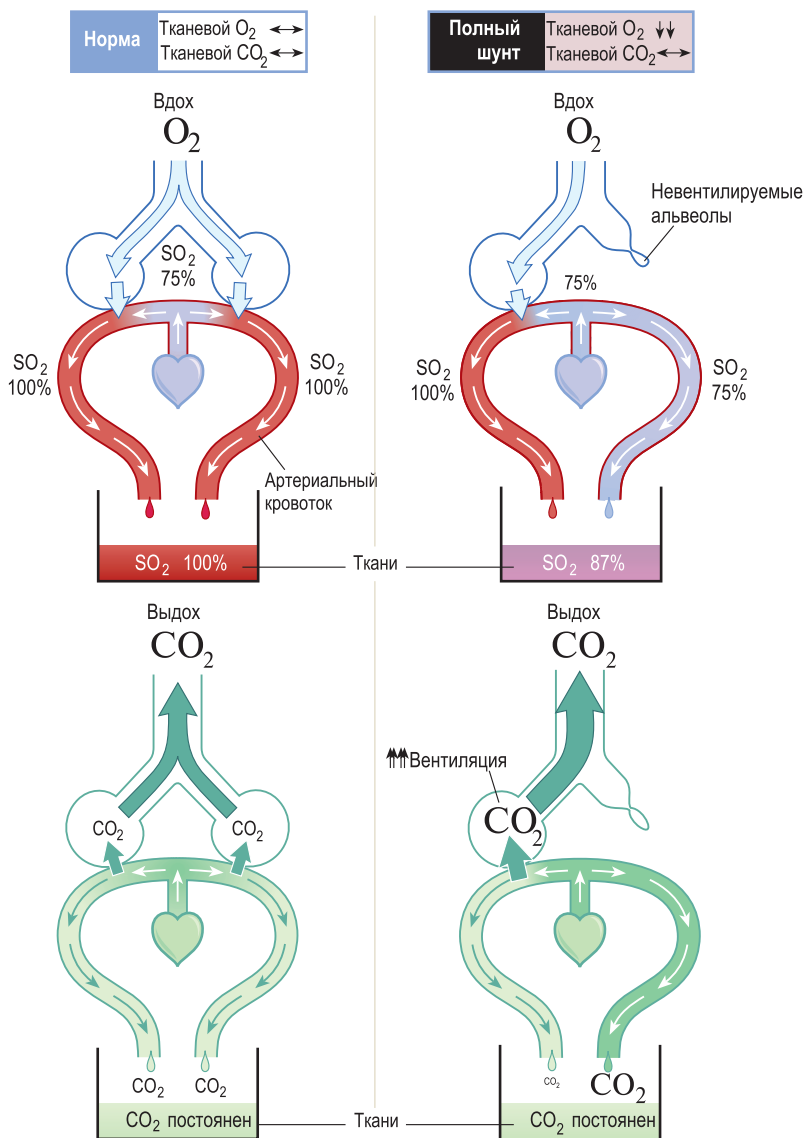
Ситуация с оксигенацией совсем другая. Кровь, протекающая через «хорошие» альвеолы, не может переносить больше  $O_2$ , поскольку гемоглобин уже насыщен  $O_2$  (вспомните плоскую часть кривой, с. 11). Поэтому такая кровь не может компенсировать низкое содержание  $O_2$  в шунтированной крови, и  $PaO_2$  снижается.

### Важно!

Неравномерность  $V/Q$  позволяет плохо оксигенированной крови вернуться в артериальный кровоток, снижая  $PaO_2$  и  $SaO_2$ .

Если общая альвеолярная вентиляция не снижается, то неравномерность  $V/Q$  не приводит к снижению  $PaCO_2$ .

<sup>1</sup> Этот термин также применяется в случае, если кровь вообще не попадает в альвеолы (анатомическое шунтирование).



**Рисунок 7** Эффект шунтирования на содержание кислорода и углекислого газа

# НАРУШЕНИЯ ГАЗООБМЕНА

## ГИПОКСИЯ, ГИПОКСЕМИЯ И И НАРУШЕНИЕ ОКСИГЕНАЦИИ

Указанные термины часто путают, а они обозначают различные понятия.

**Гипоксия** — любое состояние, при котором ткани получают недостаточно  $O_2$  для поддержания нормального аэробного метаболизма<sup>1</sup> (рис. 9). Она может быть результатом гипоксемии (см. ниже) или нарушения кровоснабжения тканей (ишемии). Она часто сопровождается лактацидозом, поскольку клетки вынуждены переходить на анаэробный метаболизм.

**Гипоксемия** — любое состояние, при котором снижено содержание  $O_2$  в артериальной крови. Она может быть результатом нарушения оксигенации (см. ниже), снижения содержания гемоглобина (анемии) или снижения способности гемоглобина к связыванию  $O_2$  (например, в присутствии угарного газа).

**Нарушение оксигенации** — гипоксемия, возникающая в результате нарушения переноса  $O_2$  из легких в кровь. Она проявляется снижением  $PaO_2$  ( $< 10,7$  кПа;  $< 80$  мм рт. ст.).

Важно различать нарушение оксигенации (ведущее к гипоксемии) и недостаточную оксигенацию (ведущую к гипоксии). Предположим, у пациента  $PaO_2$  равно 8,5 кПа. У него нарушена оксигенация, что свидетельствует о серьезном заболевании легких. Тем не менее, при таком  $PaO_2$  обычно  $SaO_2 > 90\%$ , и если содержание гемоглобина и сердечный выброс находятся в норме, то доставка  $O_2$  тканям не нарушена.

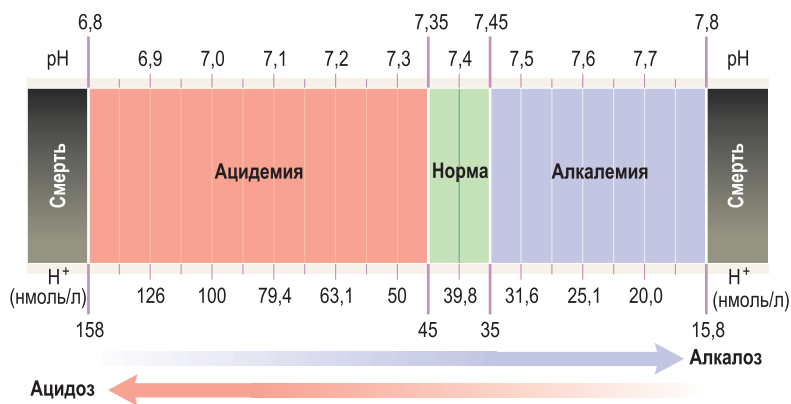
<sup>1</sup> Часто, во избежание недоразумений, рекомендуют использовать термин «тканевая гипоксия».

### Что такое pH?

Шкала pH упрощает описание больших изменений концентрации  $H^+$ , хотя на первый взгляд может показаться, что она создана с целью нас запутать! Это *отрицательная логарифмическая шкала* (рис. 10). «Отрицательная» означает, что величины pH снижаются при увеличении концентрации  $H^+$  (поэтому при pH 7,1 среда более кислая, чем при pH 7,2). «Логарифмическая» означает, что изменение pH на единицу отражает 10-кратное изменение концентрации  $H^+$  (поэтому при pH 7 среда в 10 раз кислее, чем при pH 8).

### Почему важно кислотно-основное состояние?

Для эффективного протекания процессов жизнедеятельности концентрация  $H^+$  должна находиться в жестких пределах. В противном случае нарушение этих процессов неминуемо приведет к смерти (рис. 10).



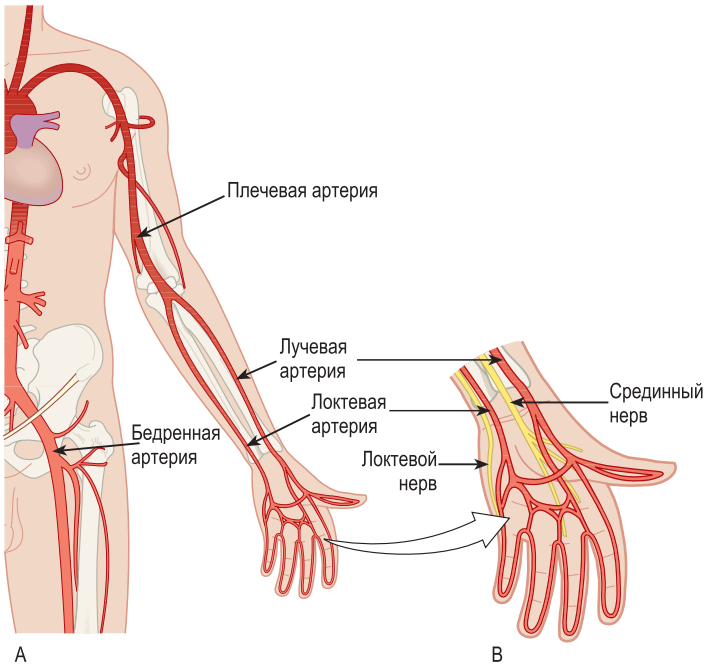
**Рисунок 10** Шкала pH/ $H^+$

## ТЕХНИКА ВЗЯТИЯ ПРОБ КРОВИ

Прежде чем сделать анализ газов крови, необходимо, конечно, взять пробу артериальной крови. Описанные здесь шаги можно использовать в качестве руководства, но лучший способ обучиться этому — практика под наблюдением специалиста.

### ПЕРЕД ВЗЯТИЕМ ПРОБЫ

- Убедитесь в необходимости анализа газов крови и выявите все противопоказания (рамка 1.6.1).
- Обязательно запишите параметры ингаляции  $O_2$  и искусственной вентиляции легких (например, установки аппарата ИВЛ).
- Если есть возможность, подождите как минимум 20 минут после любых изменений подачи  $O_2$  (т.е. до стабилизации состояния пациента).
- Объясните пациенту, зачем делается анализ, как он делается и каковы возможные осложнения (кровотечение, синяк, тромбоз артерии, инфекция и боль); затем получите согласие на исследование.
- Приготовьте необходимые инструменты (гепаринизированный шприц с колпачком, иглу 20—22 G, контейнер для утилизации острых предметов, марлю) с обычными предосторожностями.
- Определите подходящее место для взятия пробы путем пальпирования лучевой, плечевой или бедренной артерии (рис. 18). Обычно пробу стараются брать из лучевой артерии недоминантной руки (у правшей — левой).



**Рисунок 18** Места пункции артерий

**Рамка 1.6.1 Противопоказания для анализа газов крови\***

Недостаточное коллатеральное кровоснабжение в месте пункции  
 Не должно проводиться через повреждение или хирургический шунт  
 При поражении периферических сосудов дистально от места пункции  
 При нарушении свертывания крови или лечении средними и высокими до-  
 зами антикоагулянтов

\*Не являются абсолютными, решение зависит от клинической ситуации.



**Рисунок 19** Положение кисти при взятии пробы артериальной крови

#### **Совет: местный анестетик**

Взятие пробы артериальной крови (особенно из лучевой артерии) может быть очень болезненным; поэтому место пункции предварительно обезболивают введением 1 мл 1% лидокаина.

#### **Венозная или артериальная кровь?**

Темная неп пульсирующая кровь, которая требует засасывания в шприц вручную, обычно является венозной (кроме случаев тяжелого шока / остановки сердца). Другой признак венозной крови —  $SaO_2$  по результатам анализа газов крови значительно ниже, чем данные пульс-оксиметрии.

# КОГДА И ЗАЧЕМ НУЖЕН АНАЛИЗ ГАЗОВ КРОВИ?

## 1. ДЛЯ ПОСТАНОВКИ ДИАГНОЗА

Анализ газов крови — неотъемлемая часть постановки диагноза дыхательной недостаточности и первичной гипервентиляции. Он также выявляет метаболический ацидоз и алкалоз.

## 2. ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЯЖЕСТИ ЗАБОЛЕВАНИЯ

Четыре параметра, приведенные в таблице ниже, в дополнение к общей клинической оценке могут помочь выявить пациентов в критическом состоянии, требующем немедленного вмешательства.

|  |
|--|
| <b><math>PaO_2 &lt; 8</math> кПа</b>   |
| Падение $PaO_2$ ниже 8 кПа приводит к выраженному снижению $SaO_2$ (крутой участок кривой диссоциации оксигемоглобина) и, следовательно, содержания $O_2$ в крови.   |
| <b>Рост <math>PaCO_2</math></b>  |
| Поскольку почечная компенсация развивается в течение нескольких дней или недель, быстрое увеличение $PaCO_2$ приводит к соответствующему падению pH. При дыхательных нарушениях рост $PaCO_2$ часто указывает на устойчивость дыхательных мышц, что является угрожающим знаком. Необходимо немедленно остановить процесс, ведущий к дыхательной недостаточности, например с помощью ИВЛ. |
| <b><math>BE &lt; -10</math> ммоль/л / <math>HCO_3^- &lt; 15</math></b>   |
| Эти параметры включены в несколько систем оценки тяжести состояния, и если такие величины связаны с лактацидозом, то имеется выраженная тканевая гипоксия.   |
| <b><math>H^+ &gt; 55</math> нмоль/л / <math>pH &lt; 7,25</math></b>  |
| Падение pH значительно ниже нормального диапазона показывает, что компенсаторные механизмы не справляются, и это является неотложным состоянием.   |

## НОРМАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ГАЗОВ КРОВИ

При анализе газов крови обычно измеряют и приводят для справки следующие параметры (нормальные диапазоны даны в скобках):

$\text{H}^+$  (35–45 нмоль/л) < 35 = алкалемия > 45 = ацидемия

Концентрация свободных ионов водорода — это мера кислотности или щелочности раствора.

pH (7,35–7,45) < 7,35 = ацидемия > 7,45 = алкалемия

Отрицательный логарифм концентрации ионов  $\text{H}^+$  — принятое выражение этой концентрации. Из-за логарифмического характера шкалы небольшие изменения pH отражают значительные изменения в концентрации ионов  $\text{H}^+$ .

$\text{PO}_2$  (> 10,6 кПа или > 80 мм рт. ст. в артериальной крови при дыхании атмосферным воздухом)

Парциальное давление  $\text{O}_2$  можно рассматривать как движущую силу, заставляющую молекулы  $\text{O}_2$  перемещаться из одного места в другое.  $\text{PO}_2$  не отражает содержания  $\text{O}_2$  в крови, но от него зависит степень сатурации Hb кислородом. Парциальное давление  $\text{O}_2$  в артериальной крови обозначают как  $\text{PaO}_2$ .

$\text{PCO}_2$  (4,7–6,0 кПа или 35–45 мм рт. ст. в артериальной крови)

Парциальное давление  $\text{CO}_2$  можно рассматривать как движущую силу, заставляющую молекулы  $\text{CO}_2$  перемещаться из одного места в другое, и (в отличие от  $\text{PO}_2$ ) оно прямо пропорционально содержанию  $\text{CO}_2$  в крови. Парциальное давление  $\text{CO}_2$  в артериальной крови обозначают, как  $\text{PaCO}_2$ .

$\text{SO}_2$  (> 96% при дыхании атмосферным воздухом)

Сатурация гемоглобина кислородом — это процент гемоглобина, связанного с кислородом. Сатурация отражает, насколько используется способность крови к переносу  $\text{O}_2$ . Сатурацию гемоглобина кислородом в артериальной крови обозначают, как  $\text{SaO}_2$ .

## КЛИНИЧЕСКИЙ ПРИМЕР 7

### Анамнез

В отделение поступила 77-летняя пациентка с первичным диагнозом инсульта, у которой наблюдался правосторонний гемипарез, нарушения зрения и речи. Из-за проблем с глотанием ей назначили питание через назогастральный зонд, но через 24 часа у нее возникла сильная рвота. В целом состояние пациентки казалось удовлетворительным, но через несколько часов дыхание стало затрудненным.

### Обследование

Она возбуждена, страдает, температура повышена. В нижних отделах легких отмечаются притупление перкуторного звука и грубая крепитация. Со стороны неврологического статуса — острое помутнение сознания, остальное — как при поступлении.

|                                     |                               |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| Пульс                               | 92 ударов/мин                 |
| Частота дыхания                     | 28 вдохов/мин                 |
| Артериальное давление               | 112/65 мм рт. ст.             |
| SaO <sub>2</sub> (пульс-оксиметрия) | 92% (при 60% O <sub>2</sub> ) |



| Анализ газов крови            |                 | Артериальная кровь | При дыхании 60% O <sub>2</sub> |
|-------------------------------|-----------------|--------------------|--------------------------------|
| 23/07/2006                    |                 |                    |                                |
| № 00654545                    |                 |                    |                                |
| Мари Ватерс                   |                 |                    | <b>Норма</b>                   |
| H <sup>+</sup>                | 38,8 нмоль/л    |                    | (35–45)                        |
| pH                            | 7,41            |                    | (7,35–7,45)                    |
| PCO <sub>2</sub>              | 4,43 кПа        |                    | (4,7–6,0)                      |
|                               | 33,2 мм рт. ст. |                    | (35–45)                        |
| PO <sub>2</sub>               | 8,67 кПа        |                    | (> 10,6)                       |
|                               | 65,0 мм рт. ст. |                    | (> 80) <sup>1</sup>            |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | 21,2 ммоль/л    |                    | (22–28)                        |
| BE                            | -2,8 ммоль/л    |                    | (-2...+2)                      |
| SpO <sub>2</sub>              | 92,7%           |                    | (> 98%)                        |
| Лактат                        | 1,6             |                    | (0,4–1,5)                      |
| K <sup>+</sup>                | 4,0 ммоль/л     |                    | (3,5–5)                        |
| Na <sup>+</sup>               | 144 ммоль/л     |                    | (135–145)                      |
| Cl <sup>-</sup>               | 103 ммоль/л     |                    | (95–105)                       |
| iCa <sup>2+</sup>             | 1,2 ммоль/л     |                    | (1–1,25)                       |
| Hb                            | 13 г%           |                    | (12,0–16,0 г%)                 |
| Глюкоза                       | 6,6 ммоль/л     |                    | (3,5–5,5)                      |

## Вопросы

- Опишите газообмен.
  - Опишите кислотно-основное состояние.
- Каков наиболее вероятный диагноз?
- Каково состояние пациентки: удовлетворительное, средней тяжести или тяжелое?

<sup>1</sup> При дыхании 60% кислородом PO<sub>2</sub> артериальной крови в норме должно быть значительно выше (прим. ред.).