



Clinical applications of blood gas analysis: a comparative review of arterial and venous blood gas monitoring in critical care

Gyeo Ra Lee

Division of Trauma and Surgical Critical Care, Department of Surgery, Seoul St. Mary's Hospital, College of Medicine, The Catholic University of Korea, Seoul, Korea

Клиническое применение анализа газов крови: сравнительный обзор мониторинга газового состава артериальной и венозной крови в отделениях интенсивной терапии

Перевод А.А. Науменко
Южно-Сахалинск
2026 год



Анализ газов крови является важным диагностическим инструментом, используемым для оценки кислотно-основного состояния, вентиляции и оксигенации у критически больных пациентов [1]. Анализ газов артериальной крови (АГАК) остается «золотым стандартом», в первую очередь благодаря своей точности в измерении оксигенации [2]. В отличие от него, анализ газов венозной крови (АГВК) представляет собой менее инвазивную альтернативу и особенно полезен для оценки кислотно-основного статуса и метаболической функции [3]. Важные параметры, такие как сатурация центральной венозной крови (ScvO_2) и веноартериальная разница напряжения углекислого газа ($\Delta\text{Pv-aCO}_2$), предоставляют ключевую информацию о гемодинамическом статусе, сердечном выбросе и тканевой перфузии [4]. Хотя АГВК не может заменить АГАК для точной оценки оксигенации, он остается ценным инструментом в клинических сценариях, связанных с гемодинамическим мониторингом, ведением шока и принятием решений в критических состояниях [5].

КЛЮЧЕВЫЕ СООБЩЕНИЯ

- Анализ газов артериальной и венозной крови являются критически важными диагностическими инструментами в интенсивной терапии, каждый из которых обладает определенными преимуществами и ограничениями, требующими тщательного учета.
- Анализ газов артериальной крови необходим для точной оценки оксигенации и вентиляции, однако он является инвазивным и сопряжен с процедурными рисками.
- Анализ газов венозной крови, напротив, является менее инвазивным, что позволяет проводить более частый мониторинг, но его возможности ограничены в оценке ключевых клинических параметров, в частности, статуса оксигенации.
- Интеграция анализа газов артериальной и венозной крови в соответствии с индивидуальными потребностями пациента в условиях отделения интенсивной терапии позволяет минимизировать инвазивные вмешательства, обеспечивая при этом эффективное и своевременное принятие клинических решений.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ газов крови (АГК) — это часто выполняемое исследование у постели больного, предназначенное для оценки кислотно-щелочного равновесия, состояния вентиляции и доставки кислорода пациентам в критическом или остром состоянии [1]. Данный анализ позволяет быстро оценить дыхательную функцию, оксигенацию, уровень электролитов и метаболические показатели, что делает его незаменимым в



отделениях неотложной помощи, реанимации и операционных, а также при ведении пациентов с респираторными и метаболическими нарушениями [2]. В частности, АГК жизненно важен для оценки состояния критически больных пациентов и определения соответствующих стратегий лечения, что подчеркивает необходимость быстрого и точного анализа [3]. Предпочтительным образом для АГК является артериальная кровь, собранная анаэробно путем артериальной пункции или через установленный артериальный катетер, что делает артериальный забор «золотым стандартом» метода [4]. Это отличает АГК от общих анализов крови, которые обычно используют венозную кровь, полученную путем периферической венепункции [5]. В некоторых случаях, в основном у новорожденных и детей младшего возраста, используется капиллярная кровь [6]. Хотя венозная кровь пригодна для оценки кислотно-основного баланса, она не может быть использована для точной оценки состояния оксигенации, что ограничивает ее полезность [7].

Анализ газов артериальной крови (АГАК) предполагает забор крови из артерии, наиболее часто — из лучевой артерии, благодаря ее легкой доступности и более низкому риску осложнений [1]. Перед использованием лучевой артерии необходимо подтвердить адекватность коллатерального кровообращения с помощью пробы Аллена [2]. Альтернативными точками доступа являются плечевая и бедренная артерии, однако забор из плечевой артерии сопряжен с риском повреждения нерва, а использование бедренной артерии несет большие риски кровотечения и инфицирования, что обычно ограничивает ее применение неотложными ситуациями [3,4]. Возможные осложнения АГАК включают боль, кровотечение, образование гематомы, артериальный спазм, тромбоз, инфицирование, а также повреждение прилегающих тканей или нервов [5]. Подобные осложнения могут быть минимизированы за счет применения корректной техники и осторожного обращения [6]. Учитывая критическую важность специальных навыков для обеспечения безопасности и комфорта пациента, проводить артериальный забор крови имеют право только обученные медицинские специалисты [7].

Анализ газов венозной крови (АГВК) является менее инвазивным и более простым в выполнении по сравнению с АГАК, что повышает комфорт пациента и снижает риск таких осложнений, как кровотечение, образование гематомы и артериальный спазм [1]. Он также позволяет проводить повторные заборы, что является значительным преимуществом для непрерывного мониторинга состояния пациента. У критически больных пациентов в ОИТ часто установлены артериальные катетеры, первоначально предназначенные для непрерывного мониторинга артериального давления, что облегчает и делает более комфортным забор артериальной крови для анализа газов крови [2]. Тем не менее, установка артериального катетера остается инвазивной процедурой, требующей технических навыков [3]. В то же время у многих критически больных пациентов, нуждающихся в частых анализах газов крови,



имеются центральные венозные катетеры (ЦВК), что позволяет безопасно проводить забор венозной крови и снижает потребность в повторных венепункциях [4]. Использование венозной крови для анализа газов крови повышает удобство для медицинского персонала и предоставляет более безопасную и комфортную альтернативу для пациентов. В **Таблице 1** представлено сравнение ключевых различий между АГАК и АГВК. АГВК предлагает существенные преимущества, включая простоту взятия пробы, меньшую инвазивность и пригодность для повторного тестирования [5]. Венозные образцы могут быть получены путем периферической венепункции или через ЦВК, что уменьшает боль и риск осложнений, таких как кровотечение, гематома или ишемия, по сравнению с артериальной пункцией [6]. Кроме того, АГВК способствует быстрой оценке состояния пациента и мониторингу лечения в отделениях неотложной помощи и ОИТ, повышая комфорт пациента и эффективность клинической работы [7].

Таблица 1. Сравнение анализа газов артериальной и венозной крови

Категория	Артериальная кровь	Венозная кровь
Место взятия образца	Артерия (лучевая, бедренная и т. д.)	Периферическая или центральная вена
Инвазивность	Более инвазивная и болезненная	Менее инвазивная и менее болезненная
Статус оксигенации	Точный (PaO_2 , SaO_2)	Ограниченный, ненадежный
pCO_2	Точный показатель; отражает вентиляцию легких	Отличается от показателя в артериальной крови примерно на 2–6 мм рт. ст.
pH и HCO_3^-	Стандартные значения	Немного ниже или сопоставимы; могут быть оценены
Показания	Незаменим при ОДН, кислотно-щелочном дисбалансе	Применяется в экстренных случаях или при наличии центрального венозного доступа
Экстренное применение	Золотой стандарт	Возможная альтернатива с ограничениями

АГВК обладает ценностью для оценки кислотно-щелочного состояния в определенной степени, однако он не может предоставить точные данные об оксигенации, которые обеспечивает АГАК [1]. Следовательно, АГАК незаменим для оценки респираторного статуса и доставки кислорода, в то время как АГВК эффективно служит в качестве вспомогательного инструмента [2]. Большинство клинических исследований в области анализа газов крови исторически были сосредоточены на артериальной крови, а установленные референсные диапазоны широко валидированы на артериальных образцах [3]. Хотя эти показатели хорошо известны клиницистам, в настоящее время наблюдается растущий интерес к изучению потенциала венозной крови в качестве альтернативы в специфических клинических ситуациях, что в основном обусловлено практическими сложностями, связанными с артериальным забором [4].



РАЗЛИЧИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИЗА ГАЗОВ АРТЕРИАЛЬНОЙ И ВЕНОЗНОЙ КРОВИ

Поскольку парциальные давления газов измеряются напрямую, тремя основными параметрами, оцениваемыми в анализе газов крови, являются pH, pCO₂ и pO₂ [1]. Концентрация бикарбоната (HCO₃⁻), напротив, рассчитывается косвенно на основе этих измерений [2]. В совокупности pH, pCO₂ и HCO₃⁻ необходимы для оценки кислотно-щелочного статуса пациента. Различия между артериальной и венозной кровью обусловлены физиологическим обменом O₂ и CO₂, происходящим в капиллярных сетях тканей и альвеол [3]. Этот двухэтапный процесс газообмена жизненно важен для выполнения кровью ее основной функции: доставки кислорода из легких к периферическим клеткам и транспорта углекислого газа от клеток обратно в легкие для выведения [4]. Надлежащее функционирование этого процесса обмена критически важно для поддержания адекватной метаболической активности и дыхания [5].

Венозная кровь возвращается к сердцу после доставки кислорода и питательных веществ к тканям. По мере прохождения через ткани кровь накапливает углекислый газ и метаболические продукты [1]. Следовательно, венозная кровь содержит более низкий уровень O₂, сниженную сатурацию кислорода и более высокие концентрации CO₂ по сравнению с артериальной кровью, что приводит к незначительно более низкому pH. Понимание этих различий имеет решающее значение при выборе соответствующего образца крови для диагностической оценки [2]. В противоположность этому, артериальная кровь насыщается кислородом при прохождении через легкие, поглощая O₂ и высвобождая CO₂, прежде чем попасть в левые отделы сердца по легочным венам [3]. Предыдущие исследования [4-13], посвященные изучению возможности использования венозной крови для анализа газов крови, следуют единой и четкой методологии. Для точного сравнения артериального и венозного анализа газов крови необходимы анаэробный забор образцов и их своевременный анализ на идентичном оборудовании [4]. Исследования последовательно демонстрируют, что центральный венозный pH несколько ниже артериального, со средней артериовенозной (A-V) разницей приблизительно 0.03 единицы pH; эта разница является клинически приемлемой при учете ее в интерпретации [5]. Аналогично, pCO₂ в центральной венозной крови выше артериального, с систематическим отрицательным смещением приблизительно на -0.6 кПа (-5.0 мм рт. ст.), что делает его пригодной заменой в большинстве клинических ситуаций [6]. Поскольку HCO₃⁻ рассчитывается на основе pH и pCO₂, HCO₃⁻ в центральной венозной крови, как правило, демонстрирует несколько более высокие значения, чем артериальный HCO₃⁻, и поэтому также может служить адекватной альтернативой [7]. В отличие от этого, значения pO₂ в артериальной и венозной крови не демонстрируют надежной корреля-



ции из-за вариаций в потреблении кислорода тканями и динамике кровотока, показывая среднюю артериовенозную разницу приблизительно 8.33 кПа (63 мм рт. ст.) \pm 7.88 кПа (59 мм рт. ст.) [8]. Следовательно, уровень pO_2 в венозной крови не может точно предсказать уровень артериального pO_2 , что делает необходимым АГАК для точной оценки оксигенации [1]. Однако пульсоксиметрия предоставляет неинвазивный метод для непрерывного мониторинга сатурации кислорода в артериальной крови [2]. За исключением ситуаций, когда оценка оксигенации является обязательной из-за респираторных нарушений, АГВК предпочтительнее для оценки кислотно-щелочного статуса, позволяя избежать осложнений, связанных с артериальным забором [3]. Более того, пациенты, требующие частого проведения анализа газов крови, также регулярно проходят забор венозной крови для других диагностических тестов. Использование единого венозного образца для проведения множественных диагностических исследований повысит эффективность, улучшит безопасность пациента и снизит затраты на здравоохранение [4].

РАЗЛИЧИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ ВЕНОЗНОЙ КРОВИ, СМЕШАННОЙ ВЕНОЗНОЙ КРОВИ И ЦЕНТРАЛЬНОЙ ВЕНОЗНОЙ КРОВИ

Многочисленные предыдущие исследования, оценивающие надежность венозной крови, использовали образцы, полученные путем периферической венепункции [4,8,14,15]. Периферическая кровь, собранная методом венепункции, отличается по газовым показателям от центральной и смешанной венозной крови [1]. В отличие от артериальной крови, которая сохраняет стабильные газовые значения до достижения капиллярного русла тканей, показатели газов венозной крови могут варьироваться в зависимости от места забора [2]. Центральная венозная кровь конкретно относится к образцам крови, полученным через ЦВК. Помимо облегчения забора крови для диагностики, ЦВК позволяют проводить непрерывный мониторинг ЦВД, что жизненно важно для ведения гемодинамически нестабильных пациентов [3]. Кроме того, эти катетеры обеспечивают сосудистый доступ для введения лекарств, инфузионных растворов и переливания крови [4]. Обычно ЦВК устанавливается через яремную или подключичную вену, и его кончик располагается вблизи соединения верхней полой вены и правого предсердия, собирая, таким образом, венозную кровь преимущественно от верхней половины тела [5]. Однако, поскольку эта кровь не включает отток от нижней полой вены, центральная венозная кровь не является истинной смешанной венозной кровью [6]. Полное смешивание венозной крови происходит только после ее поступления в легочную артерию [7]. Следовательно, лишь катетеризация легочной артерии позволяет получить полностью смешанную венозную кровь [1]. Это различие имеет решающее значение для точной оценки системной оксигенации и гемодинамического статуса. Однако катетеры легочной артерии



повсеместно не часто используются в отделении интенсивной терапии [2]. Таким образом, центральная венозная кровь часто служит заменой смешанной венозной крови в клинической практике. Хотя центральная венозная кровь не может полностью заменить смешанную венозную кровь, она может функционировать в качестве частичной альтернативы в определенных клинических ситуациях [3]. Смешанная венозная кровь, полученная непосредственно из легочной артерии, отражает комплексную смесь венозного возврата со всего организма, тем самым точно представляя общее потребление кислорода тканями и метаболическое состояние [4]. В противоположность этому, центральная венозная кровь берется из верхней полой вены или других центральных вен и в основном включает венозный возврат от верхней половины тела, предоставляя лишь частичную информацию о метаболизме и оксигенации (**Рисунок 1**) [5]. Как правило, насыщение кислородом центральной венозной крови (ScvO_2) приблизительно на 2%–3% ниже, чем насыщение кислородом смешанной венозной крови (SvO_2), и, следовательно, оно может использоваться в качестве дополнительного показателя, особенно у пациентов с такими состояниями, как сепсис или шок [6].

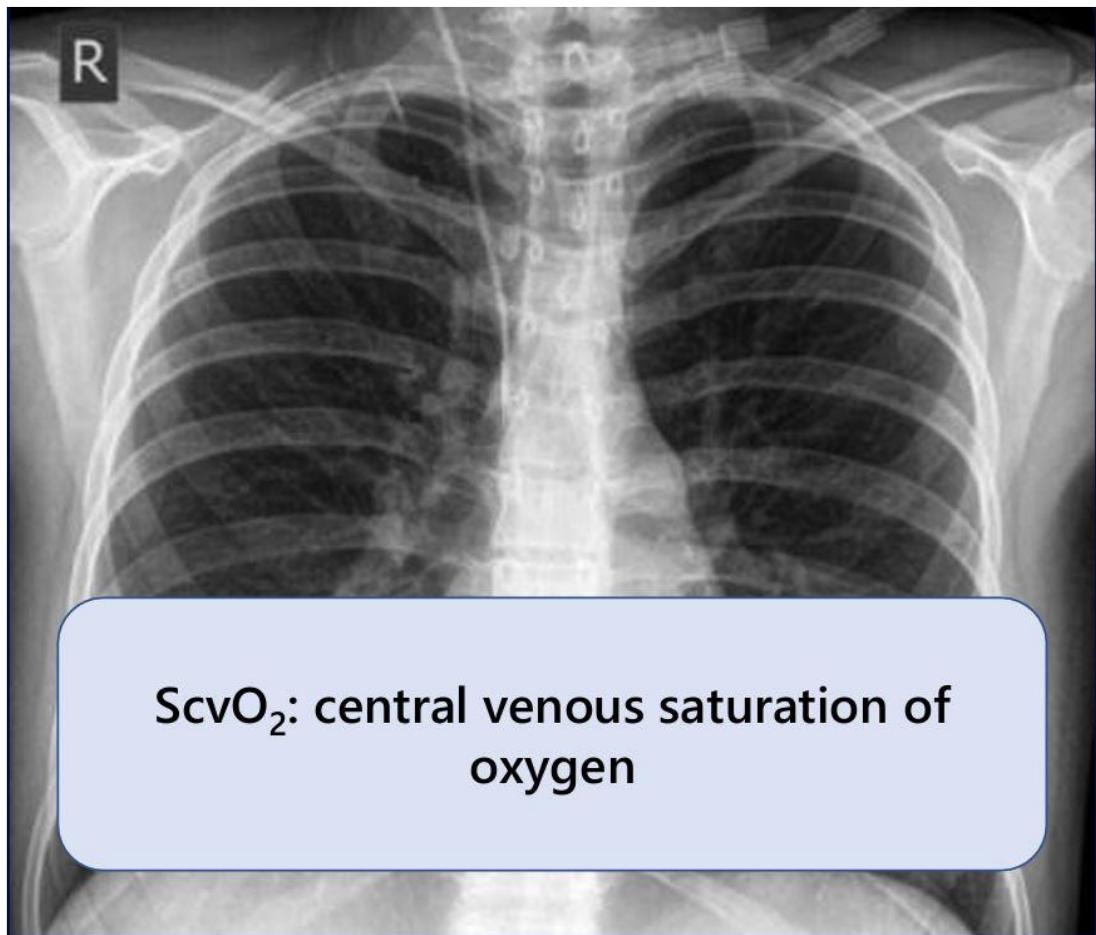


Рисунок 1. Рентгенограмма грудной клетки, показывающая положение центрального венозного катетера в верхней полой вене, используемого для измерения сатурации кислорода центральной венозной крови (ScvO_2) в рамках гемодинамического мониторинга.



ГЕМОДИНАМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ С ПРИМЕНЕНИЕМ АНАЛИЗА ГАЗОВ ВЕНОЗНОЙ КРОВИ

Гемодинамический мониторинг поддерживает принятие клинических решений, играя таким образом ключевую роль в интенсивной терапии [17]. Ключевой задачей является своевременное предупреждение для облегчения принятия решений до наступления неблагоприятных событий. Большинство переменных в гемодинамическом мониторинге отражают параметры макроциркуляции, поскольку оптимизация макрогемодинамических условий, как правило, предполагает улучшение микроциркуляции; однако часто это не соответствует действительности [18]. С течением времени анализ газов крови сохраняет преимущество перед такими показателями, как лактат, дефицит оснований и ScvO_2 , поскольку он предоставляет важную информацию о сердечном выбросе, перфузии микроциркуляторного русла и анаэробной метаболической активности [19]. В частности, веноартериальная разница напряжения углекислого газа ($\Delta\text{Pv-aCO}_2$) служит критическим индикатором этих физиологических процессов. Учитывая, что эти параметры представляют собой фундаментальные цели гемодинамического мониторинга, анализ газов крови обладает значительной клинической ценностью в оценке циркуляторного и метаболического статуса пациента [20]. Данные, полученные при анализе газов крови, точнее отражают истинный микроциркуляторный кровоток и метаболическое состояние, указывая на нарушение утилизации кислорода и гемодинамическую нестабильность [21,22].

НАСЫЩЕНИЕ КИСЛОРОДОМ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ВЕНОЗНОЙ КРОВИ (ScvO_2)

У здоровых людей ScvO_2 , как правило, примерно на 3% ниже, чем SvO_2 , что объясняется более низким коэффициентом экстракции кислорода (O_2ER) в нижней половине тела по сравнению с верхней [16]. Однако при шоковых состояниях это соотношение $\text{ScvO}_2/\text{SvO}_2$ меняется на обратное из-за увеличения экстракции кислорода в нижней половине тела. В частности, у пациентов с септическим шоком ScvO_2 может превышать SvO_2 до 8% из-за повышенного O_2ER в нижних конечностях [16]. Некоторые исследования указывают, что ScvO_2 может надежно заменять значения SvO_2 в клинической оценке [22]. ScvO_2 находится в прямой зависимости от соотношения потребления кислорода к его доставке (VO_2/DO_2), снижаясь при недостаточности транспорта O_2 и повышаясь при снижении его утилизации [23]. При падении DO_2 организм компенсирует это повышением O_2ER . Однако без своевременного вмешательства эта компенсация в конечном итоге истощается, в результате чего VO_2 становится зависимым от DO_2 [24]. Вплоть до этого критического порога, известного как клеточная дисоксия, ScvO_2 снижается пропорционально уменьшению DO_2 . За этим пределом запоздалые или недостаточные вмешательства приводят к тяжелой



тканевой гипоксии, вызывая непропорциональный сдвиг в сторону анаэробного метаболизма. Таким образом, ScvO₂ служит ценным маркером клеточной оксигенации. Однако низкий уровень ScvO₂ не всегда является основанием для увеличения DO₂, так как это вмешательство может вызывать нежелательные эффекты [26]. Вместо этого следует в первую очередь применять меры, снижающие VO₂, такие как седация, купирование боли, контроль лихорадки, а также коррекция возбуждения или тремора. Таким образом, необходимы персонализированные терапевтические стратегии. Высокий ScvO₂ может свидетельствовать о клиническом улучшении, но также может отражать неадекватно низкое VO₂, что указывает на то, что изолированно повышенный ScvO₂ не обязательно исключает необходимость лечебных вмешательств. Независимо от значений ScvO₂ — низких, нормальных или высоких — его наиболее эффективно оценивать в сочетании с ΔPv-aCO₂ [27]. Хотя лактат является широко используемым показателем, он не всегда точно отражает тканевую гипоксию или анаэробный метаболизм, поскольку не гипоксические процессы также могут повышать его уровень [28]. Следовательно, лактат следует рассматривать в совокупности с другими параметрами. Если ScvO₂ низкое, первоначальное увеличение DO₂ приводит к повышению VO₂, но ScvO₂ остается низким, несмотря на адекватные меры. ScvO₂ начинает возрастать только тогда, когда VO₂ не зависит от DO₂, что знаменует вступление в зону независимости [25].

ВЕНОАРТЕРИАЛЬНАЯ РАЗНИЦА НАПРЯЖЕНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА (ΔPv-aCO₂)

Измерения CO₂ предоставляют более глубокое понимание макро- и микрогемодинамики по сравнению с параметрами O₂ и реагируют быстрее, чем лактат [29]. Являясь побочным продуктом метаболизма цикла Кребса, повышенное содержание CO₂ в тканях при аэробном метаболизме может указывать на усиление окислительной активности или повышенное потребление углеводов [30]. С другой стороны, повышенный уровень CO₂ также может свидетельствовать об увеличении анаэробного метаболизма [28,31]. ΔPv-aCO₂, рассчитываемая на основе анализа газов центральной венозной и артериальной крови, представляет собой разницу между парциальным давлением CO₂ в венозной и артериальной крови. Ее нормальный диапазон составляет 2–6 мм рт. ст. [32]. Изменения ΔPv-aCO₂ в первую очередь обусловлены колебаниями кровотока, а не тканевой гипоксией. Повышенное значение ΔPv-aCO₂, как правило, отражает снижение тканевой перфузии, при условии сохранения адекватной доставки кислорода [33].

Согласно уравнению Фика, примененному к метаболизму CO₂, его элиминация зависит от разницы между содержанием CO₂ в венозной крови (CvCO₂) и артериальной крови (CaCO₂), умноженной на сердечный выброс (CB): (CvCO₂ – CaCO₂) × CB [34]. Следовательно, основной детерминантой вариаций ΔPv-aCO₂ является



именно сердечный выброс, и связь между ними обратно пропорциональная [34]. Даже при низком сердечном выбросе гипервентиляция может поддерживать нормальный или сниженный уровень $\Delta Pv-aCO_2$. Таким образом, $\Delta Pv-aCO_2$ служит практическим маркером сердечного выброса и микроциркуляторного кровотока у постели больного [35]. Исследования показывают, что при гипоксической гипоксии $\Delta Pv-aCO_2$ остается ниже 6 мм рт. ст. [29]. Напротив, при ишемической гипоксии, характеризующейся снижением кровотока без изменения парциального давления O_2 в артериальной крови, $\Delta Pv-aCO_2$ повышается выше 6 мм рт. ст. [29]. Гемодинамический мониторинг с использованием анализа газов крови уже давно предоставляет возможности диагностики у постели больного, позволяя проводить своевременные и эффективные вмешательства, и сохранит свою ценность в будущем. Ни один отдельный метод гемодинамического мониторинга — статический или динамический — не является идеальным, поскольку интерпретация измерений и принятие клинических решений остаются зависимыми от оператора, и каждый подход имеет свои преимущества и ограничения. В отличие от сложных мониторинговых устройств, анализаторы газов крови широко доступны в стационарах, что делает их высоким практическим инструментом для оценки состояния кислородного обмена. Следовательно, использование анализа газов крови для гемодинамического мониторинга эффективно информирует процесс диагностики и терапии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

АГВК является все более ценной альтернативой АГАК, предлагая менее инвазивный, более безопасный и практичный метод оценки кислотно-щелочного баланса и вентиляции у критически больных пациентов. В то время как АГАК остается незаменимым для точной оценки оксигенации, АГВК достоверно измеряет pH , pCO_2 и HCO_3^- , что делает его особенно полезным в условиях неотложной помощи и интенсивной терапии. Простота забора пробы, сниженный риск осложнений и пригодность для повторных измерений при использовании АГВК повышают эффективность рабочего процесса и комфорт пациента. По мере развития клинической практики интеграция АГВК наряду с АГАК позволит оптимизировать ведение пациента, обеспечивая баланс между диагностической точностью и клинической практичесностью, что в конечном итоге улучшает исходы лечения.

Библиография доступна в оригинальной англоязычной версии данной статьи по адресу:

Acute and Critical Care 2025 May 40(2):153-159

<https://doi.org/10.4266/acc.000900>