





https://doi.org/10.51885/3134-8025_IJCS_2026_1_11

МРНТИ 27.35.00

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ПОДДЕРЖКИ КЛИНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ГЕМАТОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ГАЗОМЕТРИИ КРОВИ

ҚАН ГАЗОМЕТРИЯСЫ ТЕХНОЛОГИЯСЫНА НЕГІЗДЕЛГЕН ГЕМАТОЛОГИЯДАҒЫ КЛИНИКАЛЫҚ ШЕШІМДЕРДІ ҚОЛДАУДЫҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕРІ МЕН АЛГОРИТМДЕРІ

MATHEMATICAL MODELS AND ALGORITHMS FOR CLINICAL DECISION SUPPORT IN HEMATOLOGY BASED ON BLOOD GASOMETRY TECHNOLOGY

И.М. Увалиева ¹, Ж.Т. Рахметуллина ^{1*}, Ш.Т. Тезекпаева ¹, Р.О. Мухамедова ¹

¹Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

*Автор-корреспондент: Рахметуллина Женисгуль Толеухановна, e-mail: zhrakhmetullina@edu.ektu.kz

Ключевые слова:

газометрия крови
кислотно-основное
равновесие,
гематология,
алгоритм поддержки
решений, гипоксия,
метаболические
нарушения,
математическое
моделирование,
клиническая
диагностика

АННОТАЦИЯ

В работе представлено математическое и алгоритмическое обоснование системы поддержки клинических решений для пациентов гематологического профиля на основе анализа газометрии крови. Разработана вычислительная модель, интегрирующая уравнения газообмена и кислотно-основного равновесия, включая соотношение Гендерсона-Хассельбаха, оценку анионной разницы и компенсационных механизмов. Предложенный алгоритм позволяет формализовать интерпретацию показателей pH , P_aCO_2 , HCO_3^- и степени оксигенации, обеспечивая дифференциацию метаболических и респираторных нарушений. Результаты демонстрируют повышение объективности и воспроизводимости диагностики, а также возможность интеграции модели в клинические информационные системы. Разработанный подход способствует снижению диагностических ошибок и ускорению принятия решений в условиях интенсивной терапии.

Түйінді сөздер:

қан газометриясы,
қышқыл-сілтілік
тепе-теңдік,
гематология,
шешімдерді қолдау
алгоритмі, гипоксия,
метаболикалық
бұзылыстар,
математикалық
модельдеу,
клиникалық
диагностика

ТҮЙІНДЕМЕ

Жұмыста гематологиялық бейіндегі пациенттер үшін қан газометриясы негізінде клиникалық шешімдерді қолдау жүйесінің математикалық және алгоритмдік негіздемесі ұсынылған. Газ алмасу және қышқыл-сілтілік тепе-теңдік теңдеулерін біріктіретін есептеу моделі әзірленді, соның ішінде Гендерсон-Хассельбах теңдеуі, аниондық айырма және компенсациялық механизмдер ескерілді. Ұсынылған алгоритм pH , P_aCO_2 , HCO_3^- көрсеткіштерін және оксигенация деңгейін жүйелі түрде талдауға мүмкіндік береді, метаболикалық және респираторлық бұзылыстарды ажыратуды қамтамасыз етеді. Нәтижелер диагностиканың объективтілігі мен қайталанымдылығын арттыратынын, сондай-ақ модельді клиникалық ақпараттық жүйелерге енгізу мүмкіндігін көрсетеді. Өзірленген тәсіл қарқынды терапия жағдайында шешім қабылдау тиімділігін арттыруға бағытталған.



Keywords:

blood gas analysis,
acid–base balance,
hematology, decision
support algorithm,
hypoxia, metabolic
disorders,
mathematical
modeling, clinical
diagnostics.

ABSTRACT

This study presents the mathematical and algorithmic framework of a clinical decision support system for hematological patients based on blood gas analysis. A computational model integrating gas exchange equations and acid–base balance relationships, including the Henderson–Hasselbalch equation, anion gap assessment, and compensatory mechanisms, was developed. The proposed algorithm formalizes the interpretation of pH , P_aCO_2 , HCO_3^- , and tissue oxygenation parameters, enabling differentiation between metabolic and respiratory disorders. The results demonstrate improved objectivity and reproducibility of diagnostic evaluation and highlight the feasibility of integrating the model into clinical information systems. The developed approach contributes to reducing diagnostic errors and accelerating decision-making in intensive care settings.

ВВЕДЕНИЕ

Современная гематология характеризуется высокой сложностью диагностических и терапевтических решений, обусловленной многофакторным влиянием гипоксии, метаболических нарушений и системных воспалительных процессов на состояние пациента (Mirabelli, et al, 2024). Газометрия крови представляет собой один из наиболее информативных методов количественной оценки кислородного транспорта, вентиляционной функции и кислотно-основного равновесия (КОР), позволяя объективно оценивать физиологические изменения, сопровождающие анемии, гемолиз, септические состояния и нарушения тканевой перфузии (Yee, et al, 2022, Castro, et al, 2024, Khadka, et al, 2023). В условиях интенсивной терапии гематологических пациентов интерпретация показателей газового состава крови требует системного анализа взаимосвязей между pH , P_aCO_2 , HCO_3^- , электролитным балансом и степенью оксигенации тканей (Sanghavi, et al, 2023).

Несмотря на широкое применение газометрии крови, клиническая интерпретация результатов остаётся сложной задачей, требующей интеграции большого объёма физиологических данных (Zeiler, et al, 2022). Развитие математических моделей и алгоритмов поддержки клинических решений позволяет формализовать процессы анализа кислотно-щелочного состояния и повысить объективность диагностики (Khadka, et al, 2023). Использование уравнений Гендерсона–Хассельбаха, анионной разницы, формулы Винтера и расчёта альвеолярно-артериального градиента кислорода создаёт основу для алгоритмизированной оценки метаболических и респираторных нарушений, особенно значимых при гематологических заболеваниях, сопровождающихся гипоксией и метаболическим стрессом (Sanghavi, et al, 2023).

Актуальность исследования обусловлена необходимостью интеграции физиологических и математических подходов в единую систему поддержки клинических решений, позволяющую снизить вероятность диагностических ошибок и повысить скорость интерпретации лабораторных данных.

Цель исследования – разработать и описать математические модели и алгоритмы поддержки клинических решений на основе анализа газометрии крови для повышения эффективности диагностики кислотно-основных нарушений у пациентов гематологического профиля.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ газового состава крови

Анализ газового состава крови (arterial blood gas analysis, ABG) представляет собой важный лабораторный метод, направленный на количественную оценку парциальных давлений кислорода (P_aO_2) и углекислого газа (P_aCO_2), показателя кислотности крови (pH), концентрации бикарбонатов (HCO_3^-), а также ряда производных параметров, включая base

excess (BE) и сатурацию гемоглобина кислородом (S_aO_2). Данное исследование позволяет комплексно охарактеризовать состояние газообмена, вентиляционно-перфузионных отношений в легких, кислотно-основного равновесия (КОР) организма и, в определенной степени, тканевого метаболизма (Арапова, и др., 2022).

Основная цель анализа газов артериальной крови заключается в объективной оценке эффективности внешнего дыхания (альвеолярной вентиляции и диффузии газов через альвеолярно-капиллярную мембрану), транспорта кислорода от легких к периферическим тканям и удаления углекислого газа, образующегося в процессе аэробного метаболизма (Лахин, и др., 2024). Отклонения регистрируемых параметров служат ключевыми диагностическими маркерами нарушений респираторной, метаболической и смешанной природы, что имеет решающее значение при ведении пациентов в критических состояниях, при хронической дыхательной недостаточности, остром повреждении легких, сепсисе, шоке различного генеза, тяжелых метаболических расстройствах и др. (Petersson et al, 2023).

Наиболее информативным является анализ артериальной крови, поскольку именно артериальная кровь отражает состояние постальвеолярного газообмена и оксигенации системного кровотока (Wagner, 2023, Rhodes, et al, 2022, Lee, 2025). Стандартный набор состава газов крови включает показатели, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Стандартный набор состава газов крови

Показатели газового состава крови	Описание	Для артериальной крови	Для венозной крови
pH	интегральный показатель кислотно-основного состояния крови	7,35-7,45	7,32-7,42
PO_2 (парциальное давление кислорода)	при дыхании воздухом – характеризует степень оксигенации артериальной крови		
PCO_2 (парциальное давление углекислого газа)	основной регулятор респираторного компонента КОР, отражает адекватность альвеолярной вентиляции	80-100 мм рт. ст.	40-50 мм рт. ст.
HCO_3^- (бикарбонаты)	главный метаболический компонент буферной системы крови	22-26 ммоль/л	22-26 ммоль/л
BE (избыток оснований)	количественный показатель избытка или дефицита оснований, независимый от дыхательного компонента	от -2 до +2 ммоль/л	-
S_aO_2 (сатурация артериальной крови)	процент насыщения гемоглобина кислородом	95-99 %	-
S_vO_2 (сатурация венозной крови)	потребление кислорода тканями или недостаточная его доставка	-	60-80 %
Лактат	маркер тканевой гипоксии и метаболического стресса	0,5-1,6 ммоль/л	-

Примечание – составлено автором на основе данных (Lee G. R., 2025)

Производные параметры (стандартный бикарбонат, общий CO_2 , лактат и др.) могут дополнительно уточнять характер нарушений (Хеннеси, et al, 2009, Егорова, 2017).

В клинической практике применяются два основных варианта забора крови для газового анализа:

- Артериальная кровь (arterial blood gas, ABG) – золотой стандарт. Забор обычно осуществляется из лучевой, плечевой или бедренной артерии. Артериальная кровь характеризуется максимальным содержанием кислорода и минимальным - углекислого

газа, поскольку она поступает непосредственно из альвеолярных капилляров после газообмена в легких (Di Marco, et al, 2025). Именно поэтому анализ артериальной крови обеспечивает наиболее точную информацию об эффективности легочного газообмена, степени гипоксемии и характере нарушений вентиляции (Petersson, et al, 2023).

- Венозная кровь (venous blood gas, VBG) – альтернативный, менее инвазивный метод. Венозная кровь уже прошла периферические ткани, в результате чего в ней наблюдается существенно более низкое P_aO_2 , повышенное P_aCO_2 и несколько сниженный pH по сравнению с артериальной (Saberian, et al, 2023). Венозный газовый анализ чаще используется для оценки кислотно-основного состояния и уровня метаболизма (в частности, при сепсисе, шоке, ДКА), а также как скрининговый метод в условиях, когда артериальная пункция затруднена или нежелательна. Современные данные свидетельствуют о достаточно высокой корреляции между артериальными и центральными венозными показателями pH , P_aCO_2 и HCO_3^- при ряде состояний (особенно при ХОЗЛ, ДКА), однако P_aCO_2 и S_aO_2 венозной крови не могут адекватно отражать системную оксигенацию (Lee, 2025).

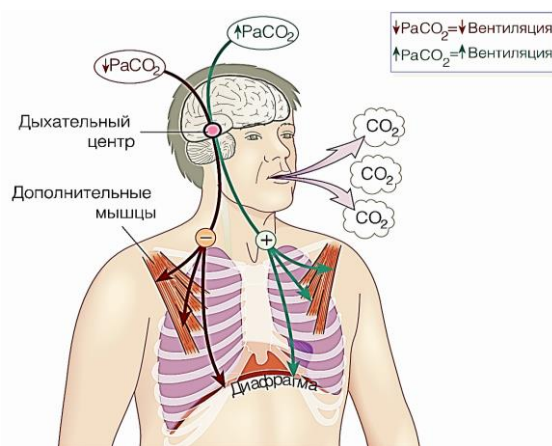


Рисунок 1. Регуляция вентиляции по уровню $PaCO_2$

Примечание – составлено авторами на основе (World Bank, 2024; WIPO, 2024)

Анализ газового состава артериальной крови остается одним из наиболее информативных и оперативных методов оценки респираторного и метаболического статуса пациента. Выбор между артериальным и венозным вариантами исследования определяется клинической ситуацией, степенью инвазивности, которую готовы принять пациент и врач, а также конкретной диагностической задачей. Точная интерпретация результатов требует системного подхода с последовательной оценкой pH , респираторного и метаболического компонентов, степени компенсации и оксигенации, что позволяет своевременно выявлять и корректировать жизнеугрожающие нарушения газообмена и кислотно-основного равновесия (Ершов, и др., 2022).

Основные модели поведения респираторных газов

Количество газа, присутствующего в любой системе, включая биологические компартменты организма, определяется давлением, которое данный газ оказывает на стенки сосуда или окружающей среды. В физиологии дыхания и газообмена ключевое значение имеет парциальное давление (partial pressure, P) каждого газа в газовой смеси (Abrahamowicz, et al, 2023).

Согласно закону Дальтона (Dalton's law of partial pressures), общее давление смеси газов равно сумме парциальных давлений всех входящих в неё компонентов, при условии, что газы не взаимодействуют химически. Парциальное давление конкретного газа

рассчитывается как доля (в процентах или долях) данного газа, умноженная на общее (барометрическое) давление. На уровне моря при стандартных условиях барометрическое давление составляет 760 мм рт. ст. (101,3 кПа). Сухой атмосферный воздух примерно на 21 % состоит из кислорода, на 0,03–0,04 % из углекислого газа и на ~78-79 % из азота (остальное - следовые газы) (Poole, et al, 2025). Следовательно:

– парциальное давление кислорода во вдыхаемом воздухе (PI_{O_2}) $\approx 0,21 \times 760 \approx 159\text{--}160$ мм рт. ст. (21,2–21,3 кПа);

– парциальное давление углекислого газа (PI_{CO_2}) $\approx 0,0003\text{--}0,0004 \times 760 \approx 0,2\text{--}0,3$ мм рт. ст. (0,03-0,04 кПа).

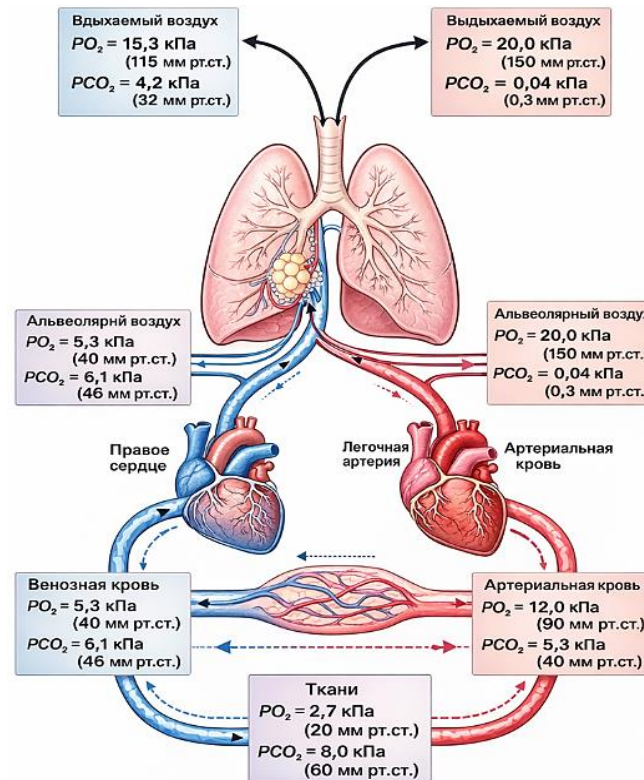


Рисунок 2. Газообмен и градиенты парциальных давлений O₂ и CO₂ в альвеолах, артериальной и венозной крови и периферических тканях

Примечание – составлено авторами на основе (Lee G. R., 2025)

В клинической практике и лабораторной диагностике парциальное давление газов крови традиционно выражают в миллиметрах ртутного столба (мм рт. ст.) или торрах (torr) (1 мм рт. ст. = 1 torr). Однако, в соответствии с Международной системой единиц (СИ), всё чаще применяют килопаскалы (кПа). Давление в СИ определяется как сила в ньютонах (Н), действующая на площадь в квадратных метрах (м²): 1 Па = 1 Н/м², 1 кПа = 1000 Па. Для перевода значений из мм рт. ст. в кПа используется коэффициент $\approx 0,1333$ (точнее 0,133322):

$$P \text{ (кПа)} = P \text{ (мм рт. ст.)} \times 0,133.$$

Например: $P_a O_2 = 100 \text{ мм рт. ст.} \approx 13,3 \text{ кПа}$; $P_a CO_2 = 40 \text{ мм рт. ст.} \approx 5,3 \text{ кПа}$.

Переход от атмосферного воздуха к альвеолярному газу сопровождается увлажнением (добавлением водяного пара с парциальным давлением ≈ 47 мм рт. ст. при 37°C) и изменением состава вследствие газообмена. Типичные значения парциальных давлений кислорода и углекислого газа в различных компартментах дыхательной системы и организма (при дыхании атмосферным воздухом на уровне моря) представлены в таблице 2 (средние ориентировочные значения) (Phyu, et al, 2023).

Скорость диффузии газов через биологические мембраны (альвеолярно-капиллярную мембрану в лёгких и капиллярно-тканевую в периферических тканях) определяется законом Фика (Fick's law of diffusion) (Green, 2025). Согласно первой формулировке закона Фика, объёмная скорость диффузии газа (V_{gas}) прямо пропорциональна:

- градиенту парциального давления газа по обе стороны мембраны ($\Delta P = P_1 - P_2$),
- площади поверхности диффузии (A),
- коэффициенту диффузии газа через среду (D , зависящему от растворимости газа и молекулярной массы – по закону Грэма скорость диффузии обратно пропорциональна \sqrt{M}),
- обратно пропорциональна толщине мембраны (T).

Математически:

$$V_{gas} = (A \cdot D \cdot \Delta P) / T \quad (1)$$

Таблица 2. Типичные значения парциальных давлений кислорода и углекислого газа в различных компартментах дыхательной системы и организма

Компартмент	PO_2 (мм рт. ст.)	PO_2 (кПа)	PCO_2 (мм рт. ст.)	PCO_2 (кПа)
Вдыхаемый воздух (сухой)	159–160	21,2–21,3	0,2–0,3	0,03–0,04
Альвеолярный воздух	100–104	13,3–13,9	35–45	4,7–6,0
Артериальная кровь (P_aO_2, P_aCO_2)	95–100	12,6–13,3	35–45	4,7–6,0
Смешанная венозная кровь	40–45	5,3–6,0	45–50	6,0–6,7
Ткани (интерстиций/клетки)	5–40 (зависит от ткани)	0,7–5,3	≈45–50	≈6,0–6,7

Примечание – составлено автором на основе данных (Phyu S. L., Turnbull C., & Talbot N., 2023)

В дыхательной физиологии этот принцип, приведенный в формуле (1), объясняет пассивный характер газообмена: кислород диффундирует из альвеол ($PO_2 \approx 100\text{--}104$ мм рт. ст.) в кровь лёгочных капилляров ($P_vO_2 \approx 40$ мм рт. ст.), а углекислый газ – в обратном направлении (из крови $P_vCO_2 \approx 46$ мм рт. ст. в альвеолы $P_aCO_2 \approx 40$ мм рт. ст.). Величина градиента ΔP является основным движущим фактором диффузии; чем больше разность парциальных давлений, тем выше скорость переноса газа.

Кроме того, растворимость газов в жидкостях (крови, тканевой жидкости) подчиняется закону Генри (Henry's law): концентрация растворённого газа прямо пропорциональна его парциальному давлению над жидкостью ($C = k_H \cdot P$), где k_H – константа растворимости (значительно выше для CO_2 , чем для O_2) (Martynov, et al, 2022).

Таким образом, основные физические законы (Дальтона, Генри, Фика) совместно определяют поведение респираторных газов в организме, обеспечивая эффективный газообмен между внешней средой, альвеолярным пространством, кровью и тканями. Нарушения градиентов парциального давления, площади диффузии, толщины мембраны или растворимости приводят к расстройствам оксигенации и элиминации CO_2 , что лежит в основе многих патологических состояний дыхательной и сердечно-сосудистой систем.

Математическая интерпретация кислотно-основного состояния

Основным источником кислоты в организме является метаболизм углеводов и жиров. Ежедневно при углеводно-жировом обмене генерируется от 15 000 до 20 000 ммоль двуокиси углерода (CO_2). CO_2 сама по себе не является кислотой, но в присутствии одного из представителей семейства ферментов карбоангидраза CO_2 соединяется в крови с водой (H_2O), образуя угольную кислоту (H_2CO_3), которая распадается на ион водорода (H^+) и бикарбонат (HCO_3^-). H^+ связывается с гемоглобином в эритроцитах и высвобождается при оксигенации в альвеолах, в этот момент реакция обратима другой формой карбоангидразы, образуя воду (H_2O), которая выводится почками, и CO_2 , которая выдыхается с каждым выдохом.

Кислотно-щелочной баланс поддерживается с помощью химических буферных систем, легочной и почечной активности. Химические буферные системы – это растворы, демпфирующие изменения pH . Внутри- и внеклеточные буферные системы немедленно реагируют на нарушения кислотно-основного баланса. Важную буферную функцию выполняют и кости, особенно при перегрузке кислотами (Imenez Silva, et al, 2022).

Буферная система состоит из слабой кислоты и связанного с ней основания. Основание присоединяет H^+ , а слабая кислота его отсоединяет, тем самым сводя к минимуму изменения концентрации свободного H^+ . Буферная система позволяет минимизировать изменения pH вблизи константы равновесия (pKa). Таким образом, хотя в организме потенциально существуют много буферных пар, физиологически значимы только некоторые из них.

В рамках исследования математическая интерпретация кислотно-основного состояния осуществлялась с использованием комплекса физиологически обоснованных уравнений, описывающих взаимосвязь между вентиляционными, метаболическими и электролитными параметрами крови. Формулы интегрировались в алгоритм поддержки клинических решений и применялись для количественной оценки кислотно-щелочного баланса, выявления скрытых метаболических нарушений и оценки адекватности компенсаторных реакций организма.

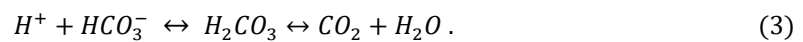
1) Уравнение Гендерсона-Хассельбаха (Lucy, et al, 2023)

Отношения между pH буферной системы и концентрацией ее компонентов описывается уравнением Гендерсона-Хассельбаха:

$$pH = pKa + \lg \frac{[anion]}{[weak\ acid]}, \quad (2)$$

где pKa (2) представляет собой константу диссоциации слабой кислоты.

Наиболее важная внеклеточная буферная система HCO_3^-/CO_2 описывается уравнением:



Увеличение концентрации H^+ сдвигает уравнение (3) вправо, т.е. образуется CO_2 .

Эта важная буферная система регулируется на высоком уровне. Концентрацию CO_2 можно точно контролировать с помощью альвеолярной вентиляции, а концентрации H^+ и HCO_3^- можно точно отрегулировать с помощью почечной экскреции.

Соотношение между pH , HCO_3^- , и CO_2 в системе, описываемой уравнением Гендерсона-Хассельбаха, следующее:

$$pH = 6,1 + \lg \frac{HCO_3^-}{0,03 \cdot PCO_2}, \quad (4)$$

где HCO_3^- измеряется в мЭкв/л, а PCO_2 , HCO_3^- – это парциальное давление CO_2 , измеряемое в мм рт.ст., или аналогично, с помощью уравнения Кассирера-Блайха (5), полученного из уравнения Гендерсона-Хассельбаха (4):

$$H^+ = 24 \cdot \frac{PCO_2}{HCO_3^-}. \quad (5)$$

Для преобразования артериального pH в $[H^+]$ (5) используют:

$$pH = -\lg[H^+] \quad (6)$$

или

$$[H^+] = 10^{(-pH)}. \quad (7)$$

Оба уравнения показывают, что кислотно-щелочной баланс зависит от соотношения парциального давления углекислого газа (PCO_2) и концентрации HCO_3^- в сыворотке или плазме, а не абсолютного значения только одного из этих веществ. С помощью формул (6)-(7) любую из 2 переменных можно использовать для вычисления третьей.

Уравнение Гендерсона-Хассельбаха использовалось для проверки внутренней согласованности лабораторных показателей и вычисления недостающих параметров при неполных данных. Применение модели позволило формализовать взаимодействие респираторного и метаболического компонентов регуляции кислотно-основного равновесия.

Расчёт анионной разницы (Rehman, et al, 2023)

Для дифференциальной диагностики метаболических ацидозов применялся показатель анионной разницы, отражающий наличие неизмеряемых анионов плазмы:

$$AG = Na^+ - (Cl^- + HCO_3^-). \quad (8)$$

Анионная разница использовалась как количественный индикатор накопления органических кислот и позволяла выявлять скрытые метаболические нарушения даже при относительно стабильных значениях pH .

Дельта-анионное окно и дельта-градиент

С целью выявления смешанных нарушений кислотно-основного баланса с учетом (8) рассчитывались производные показатели:

$$\Delta AG = AG - AG_{baseline} \Delta HCO_3^- = 25 - HCO_3^- \Delta \Delta = \Delta AG - \Delta HCO_3^-. \quad (9)$$

Анализ значения $\Delta \Delta$ в (9) позволял оценивать наличие сочетанных метаболических расстройств, включая комбинации ацидоза с высокой анионной разницей и метаболического алкалоза либо гиперхлоремического ацидоза (Agrò, et al, 2026).

Коррекция анионной разницы при гипоальбуминемии

С учётом того, что альбумин является значимым неизмеряемым анионом плазмы (8), выполнялась коррекция анионной разницы:

$$AG_{corr} = AG + 2.5 \times (Albumin_{normal} - Albumin_{observed}). \quad (10)$$

Использование формулы (10) повышало точность интерпретации кислотно-основных нарушений у пациентов с гипоальбуминемией, характерной для ряда гематологических состояний (Abedi, et al, 2024).

Формула Винтера

Для оценки адекватности респираторной компенсации при метаболическом ацидозе применялась формула Винтера:

$$P_aCO_2 = 1,5 \cdot [HCO_3^-] + 8 \pm 2, \quad (11)$$

где: $[HCO_3^-]$ – концентрация бикарбоната в плазме (ммоль/л или мЭкв/л); ± 2 – доверительный интервал (± 2 мм рт. ст.), отражающий вариабельность физиологической компенсации.

Формула (11) позволяет оценить степень респираторной компенсации при первичном метаболическом ацидозе (падение $[HCO_3^-]$ → стимуляция дыхательного центра → снижение P_aCO_2) (Wajwa, et al, 2022). Сравнение измеренного P_aCO_2 с ожидаемым (Adrogué, et al, 2023) представлено в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение измеренного P_aCO_2 с ожидаемым

Измеренное P_aCO_2	Интерпретация
$P_aCO_2 \approx$ ожидаемое значение (± 2 мм рт. ст.)	адекватная компенсация (чистый метаболический ацидоз)
$P_aCO_2 <$ ожидаемого (ниже нижней границы)	дополнительный респираторный алкалоз (смешанное нарушение)
$P_aCO_2 >$ ожидаемого (выше верхней границы)	недостаточная компенсация или сопутствующий респираторный ацидоз (смешанное нарушение)

Примечание: составлено автором на основе данных (Adrogué H. J., Madias N. E., 2023)

Таким образом, сравнение расчётного и фактического значений P_aCO_2 позволяло выявлять дополнительные респираторные нарушения и определять наличие смешанных кислотно-щелочных состояний.

Альвеоларно-артериальный градиент кислорода

Это ключевой расчётный показатель, характеризующий эффективность переноса кислорода из альвеоларного газа в артериальную кровь. Он отражает степень вентиляционно-перфузионного несоответствия (*V/Q mismatch*), шунтирования, диффузионных нарушений и других патологических процессов в лёгких, исключая гиповентиляцию и гипоксическое дыхание воздухом с низким содержанием O_2 .

Для этого использовалось модифицированное альвеоларное уравнение газа:

$$AaG = PAO_2 - P_aO_2, \quad (12)$$

где PAO_2 – альвеоларное парциальное давление кислорода (идеальное); P_aO_2 – артериальное парциальное давление кислорода (из газов артериальной крови).

Альвеоларное давление кислорода в формуле (12) определялось по формуле:

$$PAO_2 = FiO_2(P_{atm} - P_{H_2O}) - \frac{P_aCO_2}{RQ} \quad (13)$$

где: FiO_2 – фракция кислорода во вдыхаемом воздухе (0,21 при дыхании воздухом; 1,0 при 100 % O_2); P_{atm} – барометрическое давление (обычно 760 мм рт. ст. на уровне моря); P_{H_2O} – давление водяного пара при 37 °C \approx 47 мм рт. ст.; P_aO_2 – артериальное парциальное давление CO_2 ; RQ – респираторный коэффициент (обычно 0,8 при смешанной диете) (Sharma, et al, 2024).

Упрощённая клиническая форма

$$P_aO_2 = FiO_2 \cdot (760 - 47) - \left(\frac{P_aCO_2}{0,8}\right) = FiO_2 \cdot 713 - P_aCO_2 \cdot 1,25. \quad (14)$$

Таким образом, с учетом (14):

$$AaG = [FiO_2 \cdot (P_{atm} - 47) - \left(\frac{P_aCO_2}{0,8}\right)] - P_aO_2. \quad (15)$$

Дополнительно учитывались барометрическое давление, температура тела и дыхательный коэффициент, что обеспечивало адаптацию модели к индивидуальным физиологическим условиям пациента. Повышенный *A-a* градиент (альвеоларно-артериальная разница > возрастной нормы) указывает на лёгочную патологию как причину гипоксемии: пневмония, отёк лёгких, ТЭЛА – тромбоэмболия легочной артерии, ОРДС – острый респираторный дистресс-синдром, ателектаз, фиброз лёгких. Нормальный *A-a* градиент при гипоксемии предполагает гиповентиляцию (например, угнетение дыхательного центра), дыхание гипоксической смесью или высокогорную гипоксию.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования была разработана структурированная система математической интерпретации газового состава крови, интегрирующая ключевые физиологические уравнения в единый алгоритм поддержки клинических решений. Полученные результаты показали, что последовательное использование моделей Гендерсона-Хассельбаха, анионной разницы, формулы Винтера и расчёта альвеоларно-артериального градиента позволяет формировать многоуровневую оценку кислотно-щелочного состояния пациента (Yee, et al, 2022).

Разработанная система реализуется в виде многоуровневой архитектуры, включающей следующие компоненты:

– уровень данных, который включает входные лабораторные показатели (pH , P_aCO_2 , HCO_3^- , электролиты, альбумин, P_aO_2 , FiO_2), поступающие из лабораторной информационной системы;

- вычислительное ядро, которое реализует математические модели (уравнение Гендерсона–Хассельбаха; расчёт анионной разницы и её коррекции; формулу Винтера и расчёт альвеолярно-артериального градиента);
- логический модуль, который выполняет классификацию нарушений кислотно-основного состояния на основе правил и пороговых значений;
- модуль представления, который формирует диагностическое заключение и рекомендации.
- интеграционный слой, который обеспечивает взаимодействие с медицинскими информационными системами посредством API и стандартов HL7/FHIR.

На рисунке 3 представлена обобщённая архитектура системы поддержки клинических решений на основе газометрии крови.



Рисунок 3. Обобщённая архитектура системы поддержки клинических решений на основе газометрии крови

Примечание – составлено авторами (Увалиева И.М., 2026)

Входные параметры модели включают следующие показатели: pH , P_aCO_2 , HCO_3^- ; $-Na^+$, Cl^- ; Albumin; P_aO_2 , FiO_2 . Выходными параметрами являются:

- тип нарушения КОР (ацидоз/алкалоз);
- природа (метаболическая/респираторная);
- наличие компенсации;
- наличие смешанных нарушений;
- значения AG , AG_corr , AaG ;
- текстовое диагностическое заключение.

Алгоритм обеспечивал автоматическую классификацию первичных нарушений КОР – метаболических и респираторных ацидозов и алкалозов, а также выявление смешанных состояний, что особенно важно при гематологических патологиях, сопровождающихся тканевой гипоксией и метаболическим ацидозом. Расчёт анионной разницы и её коррекция при гипоальбуминемии позволили повысить точность диагностики скрытых метаболических нарушений, часто встречающихся у пациентов с хроническими воспалительными и неопластическими заболеваниями крови.

Формализованный алгоритм обработки данных представлен в виде псевдокода на рисунке 4.

Использование формулы Винтера показало высокую эффективность для оценки адекватности респираторной компенсации, что имеет практическое значение при анемиях и состояниях, сопровождающихся нарушением вентиляции. Дополнительное включение альвеолярно-артериального градиента кислорода обеспечило возможность дифференцировать гипоксемию лёгочного и внелёгочного происхождения, что важно при оценке дыхательной недостаточности у пациентов с гематологическими заболеваниями.

```
INPUT: pH, PaCO2, HCO3, Na, Cl, Albumin, PaO2, FIO2

IF pH < 7.35 THEN state = "acidosis"
ELSE IF pH > 7.45 THEN state = "alkalosis"

AG = Na - (Cl + HCO3)
AG_corr = AG + 2.5*(40 - Albumin)

expected_PaCO2 = 1.5 * HCO3 + 8

PAO2 = FIO2*(760-47) - PaCO2/0.8
AaG = PAO2 - PaO2

CLASSIFY disorder
OUTPUT diagnosis
```

Рисунок 4. Формализованный алгоритм обработки данных в виде псевдокода
Примечание – составлено авторами (Увалиева И.М., 2026)

В рамках вычислительного эксперимента разработанный алгоритм был реализован в виде программного прототипа, обеспечивающего интерактивную обработку данных газометрии крови и визуализацию результатов интерпретации (Рис. 5).

The figure displays three sequential screenshots of a web-based application for acid-base balance analysis. The interface is titled 'Acid-Base Balance Analysis' and features a home icon in the top left corner.

- First Screenshot:** The 'Electrolyte values' section is active, indicated by a blue circle with the number '1'. It contains four input fields: Sodium (Na, mmol/L) with the value 138, Potassium (K, mmol/L) with the value 4, Chloride (Cl, mmol/L) with the value 104, and Bicarbonate (HCO₃, mmol/L) with the value 24. A 'CONTINUE' button is at the bottom.
- Second Screenshot:** The 'Blood gas parameters' section is active, indicated by a blue circle with the number '2'. It contains two input fields: Blood pH with the value 7.42 and pCO₂ (mmHg) with the value 38. A 'CONTINUE' button is at the bottom.
- Third Screenshot:** The analysis is complete. A vertical progress bar on the left shows five steps, all of which are checked: 'Electrolyte values', 'Blood gas parameters', 'Acid-base parameter evaluation', 'Anion gap evaluation', and 'no_disturbance'. A light blue box at the bottom contains the text: 'No evidence of extracellular acid-base disturbance.' A 'START AGAIN' button is at the bottom.

Рисунок 5. Формализованный алгоритм обработки данных в виде псевдокода
Примечание – составлено авторами (Увалиева И.М., 2026)

Прототип системы включает последовательный пользовательский сценарий, отражающий архитектуру алгоритма:

- ввод электролитных параметров (Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^-) для расчёта анионной разницы;
- ввод параметров газового состава крови (pH , P_aCO_2) для определения первичного нарушения кислотно-основного состояния;

- автоматическая вычислительная обработка, включающая расчёт анионной разницы (AG), коррекцию AG с учётом уровня альбумина, оценку компенсации (формула Винтера), анализ кислотно-основного состояния;

- формирование диагностического заключения, отображаемого пользователю.

Обсуждение результатов показало, что математическая формализация газометрии крови позволяет значительно повысить воспроизводимость клинических выводов и уменьшить субъективность интерпретации. Интеграция различных физиологических моделей в единую алгоритмическую систему создаёт основу для разработки интеллектуальных систем поддержки принятия решений в гематологии. Обработка данных в системе реализуется как последовательность следующих вычислительных процессов: валидация входных данных, приведение единиц измерения, расчёт производных показателей, применение диагностических правил, формирование заключения. Интеграция системы в медицинскую информационную среду может быть реализована в виде REST API сервиса, микросервиса в составе МИС, модуля лабораторной информационной системы. Типовой сценарий использования включает автоматическую передачу данных газометрии, выполнение расчётов и возврат интерпретации врачу в интерфейсе МИС.

Воспроизводимость предложенного решения обеспечивается использованием формализованных математических моделей и алгоритмизированной логики обработки данных, что исключает субъективную вариативность интерпретации. Практическая эффективность выражается в сокращении времени анализа газометрии крови, снижении вероятности диагностических ошибок и повышении согласованности клинических решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование подтвердило высокую диагностическую значимость математической интерпретации газового состава крови при разработке алгоритмов поддержки клинических решений в гематологии. Интеграция физиологических уравнений кислотно-основного равновесия в единую вычислительную модель позволила стандартизировать анализ лабораторных данных и повысить объективность клинической оценки состояния пациентов.

Полученные результаты демонстрируют, что использование алгоритмизированных подходов способствует более точной дифференциации метаболических и респираторных нарушений, оценке компенсаторных механизмов и выявлению смешанных кислотно-щелочных состояний, что имеет особую значимость при гематологических заболеваниях, сопровождающихся гипоксией и метаболическими расстройствами.

Научная новизна работы заключается в разработке интегрированной информационно-вычислительной модели поддержки клинических решений, объединяющей физиологические модели газообмена и кислотно-щелочного баланса в единую алгоритмическую структуру, адаптированную к задачам гематологии.

В отличие от существующих подходов, в работе:

- предложена формализованная схема интерпретации газометрии крови на основе объединения уравнения Гендерсона–Хассельбаха, анионной разницы, формулы Винтера и альвеолярно-артериального градиента;

- разработан алгоритм автоматической классификации кислотно-основных нарушений и выявления смешанных состояний;

- предложена архитектура системы поддержки клинических решений, ориентированная на интеграцию в медицинские информационные системы;

- реализован подход к интерпретации данных газометрии как вычислительного pipeline, обеспечивающий воспроизводимость и снижение субъективности клинической оценки.

Практическая значимость результатов определяется возможностью внедрения разработанных математических моделей в клинические информационные системы для автоматизированной интерпретации газометрии крови.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением алгоритма за счёт анализа динамических показателей, интеграцией дополнительных биомаркеров метаболизма и разработкой интеллектуальных систем, способных адаптироваться к индивидуальным физиологическим особенностям пациентов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данная статья подготовлена в рамках проекта грантового финансирования научных исследований МНВО по теме AP26194209 «Математическое и алгоритмическое обеспечение интеллектуальной системы поддержки принятия клинических решений в гематологии и диабетологии на основе технологии газометрии крови».

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: не использовались.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Mirabelli, M., Misiti, R., Sicilia, L., Brunetti, F. S., Chiefari, E., Brunetti, A., & Foti, D. P. (2024). Hypoxia in human obesity: New insights from inflammation towards insulin resistance-A narrative review. *International journal of molecular sciences*, 25(18), 9802. <https://doi.org/10.3390/ijms25189802>
- Yee, J., Frinak, S., Mohiuddin, N., & Uduman, J. (2022). Fundamentals of arterial blood gas interpretation. *Kidney360*, 3(8), 1458-1466. <https://doi.org/10.34067/KID.0008102021>
- Castro, D., Patil, S., Zubair, M., & Keenaghan, M. (2024). Arterial blood gas. *StatPearls*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK536919/>
- Khadka, L. B., Mouzakis, F. L., Kashefi, A., Hima, F., Spillner, J. W., & Mottaghy, K. (2023). Blood gas parameters and acid-base balance during extracorporeal lung support with oxygenators: Semi-empirical evaluation. *Mathematics*, 11(19), 4088. <https://doi.org/10.3390/math11194088>
- Sanghavi, S. F., & Swenson, E. R. (2023, October). Arterial Blood Gases and Acid-Base Regulation. In *Seminars in Respiratory and Critical Care Medicine* (Vol. 44, No. 05, pp. 612-626). Thieme Medical Publishers, Inc.. <https://doi.org/10.1055/s-0043-1770341>
- Zeiler, G. E., Fuller, A., Kamerman, P., Buck, R. K., Pohlin, F., & Dzikiti, B. T. (2022). Describing acid-base balance using three different methods of analysis in a feline acute haemorrhage-resuscitation model. *Veterinary anaesthesia and analgesia*, 49(1), 65-75. <https://doi.org/10.1016/j.vaa.2021.07.004>
- Арабова, З.У., Шукуров, Ф.А., & Халимова, Ф.Т. (2022). Современные аспекты изучения адаптационных возможностей организма к условиям высокогорья (обзор литературы). *Биология и интегративная медицина*, (3 (56)), 4-47. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-aspekty-izucheniya-adaptatsionnyh-vozmozhnostey-organizma-k-usloviyam-vysokogorya-obzor-literatury> // Arabova, Z. U., Shukurov, F.A., & Khalimova, F.T. (2022). Sovremennye aspekty izucheniya adaptatsionnykh vozmozhnostey organizma k usloviyam vysokogor'ya (obzor literatury) [Modern aspects of studying the adaptive capabilities of the organism to high-altitude conditions (literature review)]. *Biologiya i integrativnaya meditsina*, (3 (56)), 4-47. (In Russ.)
- Лахин, Р.Е., Кусай, А.С., Усольцев, Е.А., Касимов, Р.Р., Цыганков, К.А., Старостин, Д.О., & Щеголев, А.В. (2024). Изменение клинических и лабораторных показателей в зависимости от тяжести травматического шока: ретроспективное когортное исследование. *Вестник интенсивной терапии имени А.И. Салтанова*, (3), 142-151.

- <https://doi.org/10.21320/1818-474X-2024-3-142-151> // Lakhin, R.E., Kusai, A.S., Usol'tsev, E.A., Kasimov, R.R., Tsygankov, K.A., Starostin, D.O., & Shchegolev, A.V. (2024). *Izmenenie klinicheskikh i laboratornykh pokazateley v zavisimosti ot tyazhesti travmaticheskogo shoka: retrospektivnoe kogortnoe issledovanie* [Changes in clinical and laboratory parameters depending on the severity of traumatic shock: a retrospective cohort study]. *Vestnik intensivnoy terapii imeni A.I. Saltanova*, (3), 142–151. <https://doi.org/10.21320/1818-474X-2024-3-142-151> (In Russ.)
- Petersson, J., & Glenn, R. W. (2023, October). Gas exchange in the lung. In *Seminars in Respiratory and Critical Care Medicine* (Vol. 44, No. 05, pp. 555-568). Thieme Medical Publishers, Inc.. <https://doi.org/10.1055/s-0043-1770060>
- Wagner, P. D. (2023, October). Blood gas transport: carriage of oxygen and carbon dioxide in blood. In *Seminars in respiratory and critical care medicine* (Vol. 44, No. 05, pp. 569-583). Thieme Medical Publishers, Inc.. <https://doi.org/10.1055/s-0043-1771160>
- Rhodes, C. E., Denault, D., & Varacallo, M. A. (2022). Physiology, oxygen transport. In *StatPearls* [Internet]. StatPearls Publishing. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK538336>
- Lee, G. R. (2025). Clinical applications of blood gas analysis: a comparative review of arterial and venous blood gas monitoring in critical care. *Acute and Critical Care*, 40(2), 153-159. <https://doi.org/10.4266/acc.000900>
- Хеннеси, А.А., & Джапп, А.А. (2009). Анализ газов артериальной крови понятным языком / пер. с англ.; под ред. В.Л. Кассиля. М.: Практическая медицина // Hennessey, A. A., & Japp, A. A. (2009). *Analiz gazov arterial'noy krovi ponyatnym yazykom* [ABC of arterial blood gas analysis]. Moscow: Prakticheskaya meditsina. (In Russ.)
- Егорова, М. О. (2017). Газово-электролитный состав крови и информативность параметров его оценки. *Справочник заведующего КДЛ*, (9), 41–54. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29947596> // Egorova, M. O. (2017). *Gazovo-elektrolitnyy sostav krovi i informativnost' parametrov ego otsenki* [Gas-electrolyte composition of blood and informativeness of its assessment parameters]. *Spravochnik zaveduyushchego KDL*, (9), 41–54. (In Russ.)
- Di Marco, F., Raimondi, F., Imeri, G., Mazzola, C., Pappacena, S., Vargiu, S., ... & Novelli, L. (2025). Unmasking hypoxemia: the role of standard PaO₂ in interpreting Arterial blood gas analysis. *Multidisciplinary Respiratory Medicine*, 20(1), 1055. <https://doi.org/10.5826/mrm.2025.1055>
- Saberian, L., Sharif, M., Aarabi, M., Broumand, B., Shafiee, M. A., & Shafiee, M. (2023). Arterial versus venous blood gas analysis comparisons, appropriateness, and alternatives in different acid/base clinical settings: a systematic review. *Cureus*, 15(7). <https://doi.org/10.7759/cureus.41707>
- Ершов, Н. Г., & Александрова, Л. Н. (2022). Оценка газового состава артериальной крови в зависимости от степени морбидного ожирения у пациентов в бариатрической хирургии. *Медико-фармацевтический журнал «Пульс»*, 24(4), 116–120. <https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2022-24-4-116-120> // Ershov, N.G., & Aleksandrova, L. N. (2022). *Otsenka gazovogo sostava arterial'noy krovi v zavisimosti ot stepeni morbidnogo ozhireniya u patsientov v bariatricheskoy khirurgii* [Assessment of arterial blood gas composition depending on the degree of morbid obesity in patients undergoing bariatric surgery]. *Mediko-farmatsevticheskiy zhurnal «Pul's»*, 24(4), 116–120. <https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6838-2022-24-4-116-120> (In Russ.)
- Abrahamowicz, A.A., Ebinger, J., Whelton, S.P., Commodore-Mensah, Y., & Yang, E. (2023). Racial and ethnic disparities in hypertension: barriers and opportunities to improve blood pressure control. *Current Cardiology Reports*, 25(1), 17-27. <https://doi.org/10.1007/s11886-022-01826-x>
- Poole, D. C., Schulze, K. M., Weber, R. E., & Musch, T. I. (2025). Oxygen Partial Pressure (PO₂), in Heavy Exercise. In *Encyclopedia of Exercise Medicine in Health and Disease* (pp. 1-8).

- Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27830-3_159-1
- Phyu, S. L., Turnbull, C., & Talbot, N. (2023). Basic respiratory physiology. *Medicine*, 51(10), 679-683. <https://doi.org/10.1016/j.mpmed.2023.07.006>
- Green, S. (2025). A Fick tool: connecting Fick's law and principle in teaching pulmonary gas exchange. *Advances in Physiology Education*. <https://doi.org/10.1152/advan.00044.2025>
- Martynov, S. B., Porter, R. T., & Mahgerefteh, H. (2022). Henry's law constants and vapor-liquid distribution coefficients of noncondensable gases dissolved in carbon dioxide. *ACS omega*, 7(10), 8777-8788. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c07044>
- Imenez Silva, P. H., & Mohebbi, N. (2022). Kidney metabolism and acid-base control: back to the basics. *Pflügers Archiv-European Journal of Physiology*, 474(8), 919-934. <https://doi.org/10.1007/s00424-022-02696-6>
- Lucy, C. A. (2023). Is Your Henderson-Hasselbalch Calculation of Buffer pH Correct?. *Journal of Chemical Education*, 100(6), 2418-2422. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c01203>
- Rehman, M. Z., Melamed, M., Harris, A., Shankar, M., Rosa, R. M., & Batlle, D. (2023). Urinary ammonium in clinical medicine: direct measurement and the urine anion gap as a surrogate marker during metabolic acidosis. *Advances in Kidney Disease and Health*, 30(2), 197-206. <https://doi.org/10.1053/j.akdh.2022.12.006>
- Agro, F. E., Pascarella, G., Ruggiero, A., & Strumia, A. (2026). Acid-Base Balance and Blood Gas Analysis After Adult Cardiac Surgery. In *Postoperative Critical Care for Adult Cardiac Surgical Patients* (pp. 395-418). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-032-01256-2_15
- Abedi, F., Zarei, B., & Elyasi, S. (2024). Albumin: a comprehensive review and practical guideline for clinical use. *European journal of clinical pharmacology*, 80(8), 1151-1169. <https://doi.org/10.1007/s00228-024-03664-y>
- Bajwa, G. S., Hussain, A., & Javaid, M. M. (2022). How to work up an adult patient with metabolic acidosis. *British Journal of Hospital Medicine*, 83(8), 1-11. <https://doi.org/10.12968/hmed.2021.0582>
- Adrogué, H. J., & Madias, N. E. (2023). Respiratory acidosis, respiratory alkalosis, and mixed disorders. *Comprehensive Clinical Nephrology E-book*, 182. <https://doi.org/10.1053/j.ajkd.2023.02.004>
- Sharma, S., Hashmi, M. F., Hendrix, J. M., & Burns, B. (2024). Alveolar gas equation. In *StatPearls* [Internet]. StatPearls Publishing. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29489223>
- Yee, J., Frinak, S., Mohiuddin, N., & Uduman, J. (2022). Fundamentals of arterial blood gas interpretation. *Kidney360*, 3(8), 1458-1466. <https://doi.org/10.34067/kid.0008102021>.

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Увалиева Индира Махмутовна – PhD, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Увалиева Индира Махмутовна – PhD, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Uvaliyeva Indira Makhmutovna – PhD, East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan

e-mail: iuvalieva@ektu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2117-5390>



Рахметуллина Женисгуль Толеухановна – кандидат физико-математических наук, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Рахметуллина Женисгуль Толеухановна – физика-математика ғылымдарының кандидаты, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Rakhmetullina Zhenisgul Toleukhanovna – Candidate of Physical-Mathematical Sciences, D.Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan

e-mail: zhrakhmetullina@edu.ektu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0554-7684>



Тезекпаева Шынар Толегеновна – докторант ОП «Информационные системы», школа цифровых технологий и искусственного интеллекта, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

Тезекпаева Шынар Толегеновна – «Ақпараттық жүйелер» БББ докторанты, цифрлық технологиялар және жасанды интеллект мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан Республикасы

Tezekpaeva Shynar Tolegenovna – PhD student, the School of Digital Technology and artificial intelligence, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan

e-mail: shtezekpaeva@edu.ektu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9552-0288>



Мухамедова Раушан Оразгалиевна – магистр, старший преподаватель кафедры «Математика», Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

Мухамедова Раушан Оразгалиевна – магистр, «Математика» кафедрасының аға оқытушысы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан Республикасы

Mukhamedova Raushan Orazgalievna – master's degree, senior lecturer at the department of Mathematics, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan

e-mail: rmukhamedova@ektu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5665-6808>