

УДК 612.235

В. П. Низовцев, Л. Ф. Зварич

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНУТРИЛЕГОЧНОГО ГАЗООБМЕНА ПРИ МЫШЕЧНОЙ РАБОТЕ В УСЛОВИЯХ ГИПОКСИЧЕСКОЙ ГИПОКСИИ

Оценка процессов внутрилегочного газообмена, особенно в условиях функционального напряжения организма и быстро меняющейся газовой среды, встречает ряд чисто методических трудностей. Имеющиеся физиологические данные по этому вопросу недостаточны и крайне противоречивы. Основной методической трудностью при таких исследованиях является необходимость определения насыщения артериальной крови кислородом (S_{aO_2}) и показателей, характеризующих разные стороны самого процесса оксигенации крови в легких и его эффективности на разных этапах мышечной работы и смены газового состава вдыхаемого воздуха.

Методика. Оксигенацию крови в легких оценивали по напряжению кислорода (P_{aO_2}) и углекислоты (P_{aCO_2}) в артериализированной капиллярной крови с помощью специальных номограмм [3]. Отбор артериализированной капиллярной крови производили в ходе функциональных исследований в тонкие гепаринизированные трубочки. Величину P_{aO_2} определяли электродом Кларка, а P_{aCO_2} — по методике Зиггарда — Андерсена и контролировали напряжением CO_2 в альвеолярном воздухе. В альвеолярном воздухе напряжение CO_2 (P_{aCO_2}) и O_2 (P_{aO_2}) определяли по методу Холдена — Пристли под контролем кривой дыхания системой двух шлангов [2]. Мышечную работу в наших исследованиях (1,22 Вт/кг) осуществляли на протяжении 14 мин. Гипоксическую гипоксию создавали посредством вдыхания газовой смеси с 13,5 % O_2 . Исследования предшествовала 12—18 мин адаптация к гипоксической смеси. Альвеолярный воздух и пробы артериализированной капиллярной крови для анализов отбирали в покое, на 3, 12 мин мышечной нагрузки и на 3, 12 мин восстановительного периода. Контролем являлись исследования в условиях дыхания воздухом.

Результаты. Как видно из таблицы, выполнение мышечной работы порядка 1,22 Вт/кг в условиях дыхания воздухом приводит к снижению оксигенации крови до 89,5 %. При той же работе в условиях дыхания гипоксической смесью оксигенация крови понижалась до 82,5 %. Одновременно наблюдалось существенное снижение альвеоло-артериального градиента парциального давления кислорода (ΔP_{aO_2}) с 31 до 9 гПа (с 23,4 до 6,5 мм рт. ст.). При мышечной работе наблюдалось снижение P_{aCO_2} с 53,3 до 47,2 гПа (с 40 до 35,5 мм рт. ст.). Переход на гипоксическую смесь сопровождался появлением уже в покое стойкой гипоксии, которая сохранялась до конца мышечной работы. Уровень альвеолярного P_{O_2} при работе в условиях гипоксии снизился до 85 гПа (64,0 мм рт. ст.), а артериального P_{O_2} — до 75 гПа (57,5 мм рт. ст.). В условиях дыхания воздухом эти величины составляли соответственно 134 и 102 гПа (101 и 76,6 мм рт. ст.).

Анализ разрозненного цифрового материала, приведенного в таблице, встречает определенные затруднения, поэтому для более наглядной интегральной оценки показателей, отражающих сдвиги в легочном газообмене, вызванные мышечной работой и изменением состава вдыхаемого воздуха, мы использовали два метода графического анализа по-

Величины P_{aO_2} , P_{aCO_2} , P_{aO_2}/P_{aCO_2} при мышечной нагрузке 1,22 (3, 12 мин) при дыхании с 13,5 % O_2

Условия	Время, мин	P_{aO_2} , гПа
Покой	—	134
Мышечная работа	3	102
14 мин	12	75
Восстановление	3	102
	12	102
Покой	—	134
Мышечная работа	3	102
14 мин	12	75
Восстановление	3	102
	12	102

лученных данных путем построения номограмм (P_{aCO_2}) и к P_{aO_2} в сист

работанные нами номограммы. По нашему мнению, основным недостатком, препятствующим использованию номограмм, не позволяющих определять смещения точек на или также от понижения артериальной крови. По П. Садуля введением по в артериальной крови, номограмму для анализа легочного газообмена при гипоксических смесями.

Как видно из рис. 1, в течение мышечной работы в условиях существенно меньшего приспособительного сдвига в вентиляционно-перфузионных диффузионных процессах выполнения мышечной работы смещением точек S_{aO_2} в капиллярах. При этом нас следовало ожидать, а в работе — даже на 4 %. Быстро нормализовалось. Обнаруженная тенденция к снижению определялась уменьшением содержания O_2 в крови, которое при снижении до 102 Па или с 92 до 75 Па падало S_{aO_2} во в

Величины P_{AO_2} , P_{aO_2} , P_{ACO_2} (P_{ACO_2}), ΔP_{AaO_2} и S_{aO_2} в покое, на 3, 12 мин мышечной нагрузки 1,22 Вт/кг массы тела и во восстановительном периоде (3, 12 мин) при дыхании воздухом (контроль) и гипоксической смесью с 13,5 % O_2 (опыт) у здоровых лиц (средние данные)

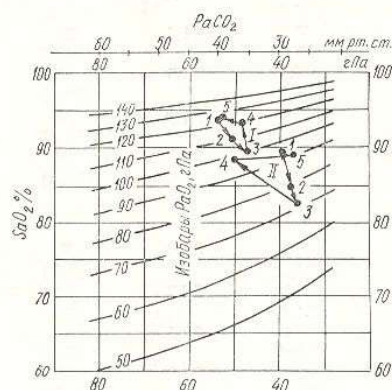
Условия	Время, мин	P_{AO_2} , гПа (мм. рт. ст.)	P_{aO_2} , гПа (мм. рт. ст.)	P_{ACO_2} , гПа (P_{ACO_2}), гПа (мм. рт. ст.)	S_{aO_2} , % по [3]	P_{AaO_2} , гПа (мм. рт. ст.)
Контроль						
Покой	—	143	122	53,3	93,3	21
Мышечная работа	3	(107,8)	(91,8)	(40,0)		(16,0)
		142	109	50,0	91,4	32
14 мин	12	(106,7)	(82,4)	(37,5)		(24,3)
		134	102	47,2	89,5	31
Восстановление	3	(101,0)	(76,6)	(35,5)		(23,4)
		138	112	48	91,9	25
	12	(103,8)	(84,5)	(36,6)		(19,3)
		143	124	52	93,8	19
		(107,5)	(93,0)	(39,2)		(14,5)
Опыт						
Покой	—	101	93	40	89,0	8
Мышечная работа	3	(75,7)	(69,8)	(30,2)		(5,9)
		90,6	78	42	83,2	12
14 мин	12	(68,0)	(58,8)	(31,8)		(9,2)
		85	76	44	82,5	8,6
Восстановление	3	(64,0)	(57,5)	(32,8)		(6,5)
		94	86	39	87,0	8,0
	12	(71,0)	(65,0)	(29,7)		(6,0)
		102	90,1	38	88,5	12
		(76,8)	(68,4)	(28,8)		(8,4)

лученных данных путем нахождения точек S_{aO_2} , отнесенных к P_{ACO_2} (P_{ACO_2}) и к P_{AO_2} в системе координат — метод П. Садуля [10], и работанные нами номограммы.

По нашему мнению, номограммы П. Садуля имеют весьма существенный недостаток, поскольку принцип, положенный в основу этих номограмм, не позволяет ответить на вопрос, отчего зависят наблюдаемые смещения точек S_{aO_2} — только ли от гиперкапнического фактора или также от понижения или повышения напряжения кислорода артериальной крови. Поэтому мы существенно дополнили номограмму П. Садуля введением показателей, отражающих напряжение кислорода в артериальной крови, и использовали такую модифицированную номограмму для анализа наших данных, характеризующих состояние легочного газообмена при мышечной работе в условиях дыхания гипоксическими смесями.

Как видно из рис. 1, положение точек S_{aO_2} в системе координат во время мышечной работы и особенно при работе в гипоксических условиях существенно меняется, что отражает сложные компенсаторно-приспособительные сдвиги, возникающие в легочном кровообращении, в вентиляционно-перфузионных отношениях, в условиях, определяющих диффузионные процессы в области альвеолярных мембран и др. Так, выполнение мышечной работы при дыхании воздухом сопровождалось смещением точек S_{aO_2} в системе координат вправо и вниз в зону гипоксии. При этом насыщение крови кислородом не повышалось, как следовало ожидать, а наоборот, понижалось на 2,5 %, а к концу работы — даже на 4 %. В восстановительном периоде насыщение крови быстро нормализовалось, точка S_{aO_2} вернулась в исходное положение. Обнаруженная тенденция к смещению точек S_{aO_2} в данном случае целиком определялась уменьшением напряжения кислорода в артериальной крови, которое при мышечной работе падало максимально (с 122 до 102 Па или с 92 до 77 мм рт. ст.). Именно снижение P_{aO_2} определяло падение S_{aO_2} во время мышечной работы, появление же гипоксических смесей.

Нужно сказать, что анализ эффективности внутригочного газообмена с помощью приведенных выше номограмм не может полностью удовлетворить исследователя, так как в них не находят количествен-



Точки СаО_2 , отнесенные к PасО_2 , (PасО_2) и PасО_2 :
1 — в покое; 2 — на 3-ей, 3 — на 12-ой мин мышечной
работы; 4 — на 3-ей, 5 — на 12-ой мин восстановления.
I — дыхание воздухом, II — дыхание гипоксической
смесью. Средние данные.

Использованный для анализа газообмена в легких метод аналогичен методу построения кривых диссоциации оксигемоглобина Баркрофта, разработанному для условий *in vitro*. Кривые связывания Hb с O₂ в легких и кривые Баркрофта можно располагать на одном графике и рассматривать кривые Баркрофта как идеальные, когда процесс оксигенации крови в легких протекает без каких-либо препятствий и P_{O₂} (P_{аO₂}) автоматически приравняется к P_{AO₂} ($\Delta P_{AaO_2} = 0$). В отличие от кривых Баркрофта, кривые связывания гемоглобина с кислородом в легких относятся к условиям целостного организма, где на оксигенацию крови действует много отягощающих факторов. Поэтому наши кривые (или отдельные ее точки) всегда оказываются смещенными вниз и вправо по отношению к кривым Баркрофта и тем больше, чем больше ΔP_{AaO_2} . Достоинством данного метода является то, что сопоставление величины S_{аO₂} и P_{AO₂} автоматически исключает маскирующее влияние на S_{аO₂} изменений уровня альвеолярной вентиляции (например, при исследованиях S_{аO₂} у больных с компенсаторной гипервентиляцией).

Метод применялся в наших исследованиях эффективности внутрилегочного газообмена с 1961 г. В своем первоначальном виде он представлял собой в высшей степени трудоемкое исследование, так как требовал прямых определений S_{aO_2} , невозможных без пункции артерии и анализа артериальной крови на аппарате Ван-Слайка. Кроме того, метод был приемлем лишь для условий покоя. Разработанные нами номограммы для расчета S_{aO_2} , по величинам P_{aCO_2} и P_{aO_2} (рис. 2, слева) резко упрощают процесс определения S_{aO_2} и делают методику построения кривых связывания с кислородом в легких более динамичной и легко доступной для клинических и экспериментальных условий.

Точки S_{aO_2} , отнесенные к P_{aO_2} , на 3-й, 3 — на 12-й мин мышечное дыхание воздухом.

Представлялось, что критерия внутрилечебного данного показатель не считается и вносится данного показателя графическом сопоставлении величинами во от кривых Баркоро, наоборот, смещение так как улучшение эффекта $\Delta P_{\text{АаО}_2}$ (рис. 2). Сочетание внутрилечебного газоснабжения преимущество, что данная кривая связыва-

На рис. 2 (справа) представлен графический анализ данных, приведенных в таблице, путем нахождения точек S_{aO_2} , отнесенных к P_{aO_2} , с учетом величины P_{aCO_2} (P_{aCO_2}) в разные фазы мышечной работы при дыхании воздухом и гипоксической газовой смесью. Как видно на рисунке, точки связывания гемоглобина с кислородом, отнесенные к P_{aO_2} , в условиях дыхания воздухом располагались ниже и вправо от зоны идеальных кривых связывания гемоглобина с кислородом, что указы-

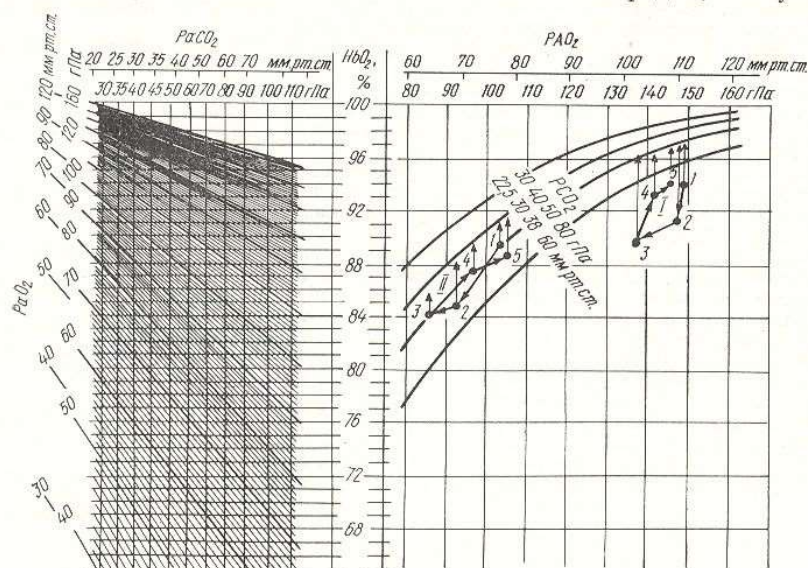


Рис. 2. Номограмма для расчета S_{aO_2} по P_{aO_2} и P_{aCO_2} (слева); оценка эффективности внутрилегочного газообмена с помощью номограммы (справа), отражающей взаимоотношения S_{aO_2} и P_{aO_2} в покое, при мышечной работе мощностью 1,22 Вт/кг и в восстановительном периоде в условиях дыхания воздухом (P_{O_2} —211 гПа или 159 мм рт. ст.) и гипоксической смесью (P_{O_2} —133 гПа или 100 мм рт. ст.). Кривые Баркрофта, построенные для разных P_{aCO_2} , использованы как контрольные, соответствующие идеальным условиям газообмена в легких.

Точки S_{aO_2} , отнесенные к P_{aO_2} , и величины ΔP_{AaO_2} (обозначены стрелками): 1—в покое; 2—на 3-й, 3—на 12-й мин мышечной работы; 4—на 3-й, 5—на 12-й мин восстановления. I—дыхание воздухом, II—дыхание гипоксической смесью. Средние данные.

вает на существенное снижение эффективности внутрилегочного газообмена. При дыхании гипоксической смесью точки S_{aO_2} резко смещались влево и вниз и располагались в центре зоны идеальных кривых связывания гемоглобина с кислородом по линии диссоциации оксигемоглобина, соответствующей P_{aCO_2} —53 Па или 40 мм рт. ст. Такая тенденция точек к смещению в покое на разных этапах работы и восстановления при переходе на гипоксическую смесь указывает на резкое повышение эффективности внутрилегочного газообмена при гипоксии.

Представлялось также важным выяснить информативность такого критерия внутрилегочного газообмена, как ΔP_{AaO_2} . По нашему мнению данный показатель представляет несомненную ценность, он легко рассчитывается и вносит количественный элемент в исследования. Ценность данного показателя резко возрастает, если его использовать в графическом сопоставлении с величиной S_{aO_2} , отнесенной к соответствующим величинам P_{aO_2} и P_{aCO_2} (P_{aCO_2}). Смещение S_{aO_2} вниз и вправо от кривых Баркрофта хорошо коррелирует с увеличением ΔP_{AaO_2} и, наоборот, смещение точек в сторону идеальных кривых, расцениваемое как улучшение эффективности газообмена, сочетается с уменьшением ΔP_{AaO_2} (рис. 2). Сочетанное использование при оценке эффективности внутрилегочного газообмена двух показателей S_{aO_2} и ΔP_{AaO_2} имеет и то преимущество, что для каждого исследования находится своя идеальная кривая связывания гемоглобина с кислородом, соответствующая