

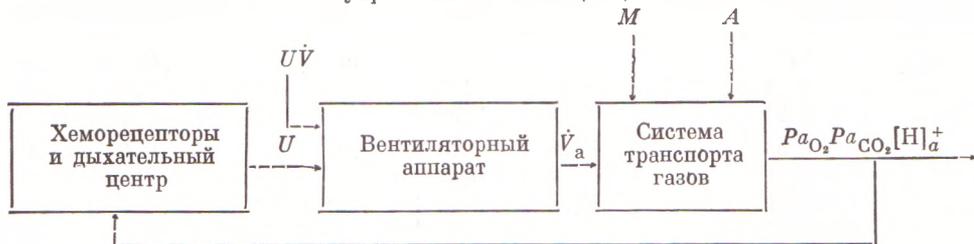
И. С. БРЕСЛАВ, Н. Н. КАРИЕВ, В. Н. САЛАЗКИН, А. М. ШМЕЛЕВА

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СДВИГОВ В СИСТЕМЕ ТРАНСПОРТА ГАЗОВ ПРИ ЗАДАНЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ РЕЖИМА ЛЕГОЧНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЧЕЛОВЕКА

(Представлено академиком В. Н. Черниговским 6 IV 1973)

Регуляция дыхания и сопряженных функций обеспечивает транспорт газов в соответствии с уровнем газообмена в организме. Как показано на схеме, механизмы, управляющие дыханием (хемотрецепторы, дыхатель-

Блок-схема системы регулирования дыхания (при включении искусственного управления вентиляцией)



U — управляющий сигнал дыхательного центра; \dot{V}_a — альвеолярная вентиляция; P_{aO_2} , P_{aCO_2} и $[H]^+_a$ — параметры газового состава и концентрации водородных ионов крови; M , A — возмущающие факторы влияния (сдвиги метаболизма и газового состава дыхательной среды); UV — управляющий сигнал при искусственно заданном режиме вентиляции.

ный центр), вентиляторный аппарат и система транспорта газов в естественных условиях образуют замкнутую систему регулирования, цель которой — поддержание постоянства газового состава крови. В качестве основных возмущающих факторов на эту систему могут влиять сдвиги метаболизма (например, при мышечной деятельности) или изменения парциальных давлений газов вдыхаемого воздуха. Естественно, что при изучении функции дыхания большое внимание уделяют процессам, которые происходят при воздействии на систему со стороны именно этих факторов. Однако замкнутость рассматриваемой системы представляет определенные ограничения для ее полного исследования.

Между тем, возможны изменения дыхания, точнее, легочной вентиляции, не зависящие от обычных механизмов регулирования. Такие изменения вентиляции имеют место в процессе произвольного управления человеком своими дыхательными движениями (¹, ³, ¹⁰), а также в условиях искусственного, управляемого дыхания, применяемого в эксперименте и в клинике (², ⁴, ⁵, ⁸). Искусственно задаваемый режим вентиляции представляет собой, по существу, фактор, который приводит к «размыканию» системы (см. схему), давая исследователю дополнительные возможности изучения и математического описания отдельных ее блоков.

Цель настоящей работы состояла в том, чтобы, используя этот своеобразный канал возмущения, изучить непосредственное влияние изменений вентиляции на систему транспорта дыхательных газов. Данный вопрос, имеющий большое теоретическое и практическое значение, пока не под-

вернут достаточно систематическому изучению в плане количественных зависимостей.

Исследования были осуществлены на 8 здоровых молодых людях обоего пола. Опыты велись в условиях спокойного дыхания воздухом через маску. Уровень легочной вентиляции задавался инструкцией, согласно которой исследуемый начинал каждый вдох по удару манометра и регулировал глубину своего дыхания, руководствуясь световой сигнализацией. Подробнее методика «заданного дыхания» была описана ранее (1).

Величину заданной вентиляции (\dot{V}) мы будем здесь выражать в долях от единицы, за которую принимается нормальный для исследуемых минутный объем дыхания. В отдельных экспериментах задавался различный

Таблица 1

Корреляционная матрица связей параметров системы транспорта газов при искусственно заданных режимах вентиляции

	\dot{V}	P_{aCO_2}	$P\bar{V}CO_2$	P_{aO_2}	S_{aO_2}	$\dot{V}O_2$	KH_{O_2}	\dot{Q}
\dot{V}	1	-0,74	-0,62	0,54	0,23	0,53	-0,31	-0,61
P_{aCO_2}	-0,74	1	0,89	-0,69	-0,46	-0,33	0,50	0,62
$P\bar{V}CO_2$	-0,62	0,89	1	-0,51	-0,45	-0,28	0,39	0,62
P_{aO_2}	0,54	-0,69	-0,51	1	0,39	-0,10	-0,80	-0,49
S_{aO_2}	0,23	-0,46	-0,45	0,39	1	-0,18	-0,40	-0,30
$\dot{V}O_2$	0,53	-0,33	-0,28	-0,10	-0,18	1	0,42	-0,31
KH_{O_2}	-0,31	0,50	0,39	-0,80	-0,40	0,42	1	0,41
\dot{Q}	-0,61	0,62	0,62	-0,49	-0,30	-0,31	0,41	1

объем вентиляции: нормальный (1,0), пониженный (0,8) либо повышенный (1,2; 1,4; 1,7; 2,0).

В ходе опыта регистрировали непрерывно действующими газоанализаторами (ГУМ-2, ММГ-7) состав выдыхаемого и альвеолярного воздуха, что позволяло определить потребление кислорода ($\dot{V}O_2$, л/мин STPD) и напряжения газов артериальной крови (P_{aO_2} , P_{aCO_2} , мм рт. ст.). Велась оксигенографическая регистрация насыщения крови кислородом (S_{aO_2} , %). Напряжение CO_2 смешанной венозной крови ($P\bar{V}CO_2$, мм рт. ст.) исследовали на основе метода Колье (7). Пользуясь принципом Фика, рассчитывали минутный объем крови (\dot{Q} , л/мин.).

В данном сообщении использованы значения исследованных параметров, зафиксированные в 56 экспериментах на 25-й мин. дыхания в заданном режиме: анализ динамики этих параметров показал, что к 25-й мин. измененного уровня вентиляции они достигают в основном постоянного значения и дыхательная система возвращается в относительно устойчивое состояние.

Для установления количественных характеристик сдвигов физиологических параметров полученные результаты были подвергнуты корреляционному анализу. Приводимая корреляционная матрица (табл. 1) дает представление о связях между всеми исследованными переменными.

Как говорилось, основное внимание нами было уделено исследованию зависимостей показателей транспорта газов от заданного уровня легочной вентиляции. Поэтому, помимо определения коэффициентов корреляции, эти зависимости были математически сформулированы с использованием метода регрессионного анализа.

Как видно из табл. 1, наиболее тесная связь обнаружилась между объемом вентиляции и параметрами транспорта углекислого газа. По мере увеличения минутного объема дыхания артериальное напряжение CO_2 ,

вследствие вымывания этого газа, снижается в следующей зависимости:

$$Pa_{CO_2} = 52,0 - 15,2\dot{V} \quad (\sigma = 5,4; R = 0,74). \quad (1)$$

Уравнение (1) показывает, что удвоение вентиляции снижает Pa_{CO_2} примерно на 15 мм рт. ст.

В том же направлении меняется напряжение CO_2 в смешанной венозной крови:

$$P\bar{V}_{CO_2} = 52,1 - 8,7\dot{V} \quad (\sigma = 4,3; R = 0,62). \quad (2)$$

Хотя падение венозного P_{CO_2} при гипервентиляции выражено почти вдвое слабее, чем артериального, оно служит важным свидетельством постепенного истощения запасов CO_2 в организме (6) по мере роста минутного объема дыхания.

Рассмотрим динамику параметров кислородного транспорта.

Напряжение O_2 в артериальной крови с увеличением вентиляции повышается. Данная зависимость описывается следующим уравнением:

$$Pa_{O_2} = 92,8 + 15,8\dot{V} \quad (\sigma = 9,7; R = 0,54). \quad (3)$$

Однако этот показатель не характеризует количества переносимого кровью кислорода, более 98% которого транспортируется, как известно, не в физически растворенном виде, а в форме оксигемоглобина. Поэтому важнее, как меняется в этих условиях оксигенация крови. Полученное нами уравнение имеет вид

$$Sa_{O_2} = 91,9 + 0,99\dot{V} \quad (\sigma = 1,6; R = 0,23). \quad (4)$$

Очевидное ничтожное влияние вентиляции на насыщение крови кислородом (увеличение Sa_{O_2} лишь на 1% при увеличении минутного объема дыхания вдвое) объясняется просто: в диапазоне тех сдвигов Pa_{O_2} , которые наступают в связи с изменениями уровня вентиляции, кривая диссоциации оксигемоглобина имеет почти горизонтальный характер. Рост вентиляции сопровождался увеличением потребления кислорода:

$$\dot{V}_{O_2} = 0,087 + 0,11\dot{V} \quad (\sigma = 0,07; R = 0,53). \quad (5)$$

Уравнение (5) не показывает «абсолютного» уровня потребления O_2 , 97% которого в покое расходуется не на внешнее дыхание, а на функционирование других систем, но из него следует, что удвоение вентиляции сопровождается добавочным расходом примерно 110 мл O_2 в 1 мин. Это обусловлено затратами энергии на работу дыхательных мышц, весьма значительными в условиях гипервентиляции (9).

Однако в исследованном диапазоне сдвигов рост поглощения кислорода в организме значительно отстает от увеличения минутного объема дыхания. В силу этого коэффициент использования кислорода (KI_{O_2}), т. е. количество O_2 , потребленного из каждого литра вентилирующего воздуха, при гипервентиляции снижается. Данная закономерность описывается следующим уравнением:

$$KI_{O_2} = 37,2 - 6,2\dot{V} \quad (\sigma = 7,5; R = 0,31). \quad (6)$$

Значительные индивидуальные различия приведенного показателя находят здесь свое отражение в довольно малом значении коэффициента корреляции.

Отмечая низкую газообменную эффективность искусственного повышения легочной вентиляции, следует указать, что оно не сопровождается соответственным ростом минутного объема крови. Наоборот, последний имеет тенденцию снижаться при увеличении вентиляции:

$$\dot{Q} = 4,4 - 0,85\dot{V} \quad (\sigma = 0,43; R = 0,61). \quad (7)$$

По-видимому, когда гипервентиляция достигается «в обход» естественных каналов регуляции дыхания, нарушаются нормальные координационные отношения между легочным воздухообменом и циркуляцией крови.

На рис. 1 приведены графики рассмотренных зависимостей.

Необходимо отметить, что попытка аппроксимации изученных нами зависимостей нелинейным образом практически не дала выигрыша в точности. Последнее свидетельствует о линейном характере этих связей, что

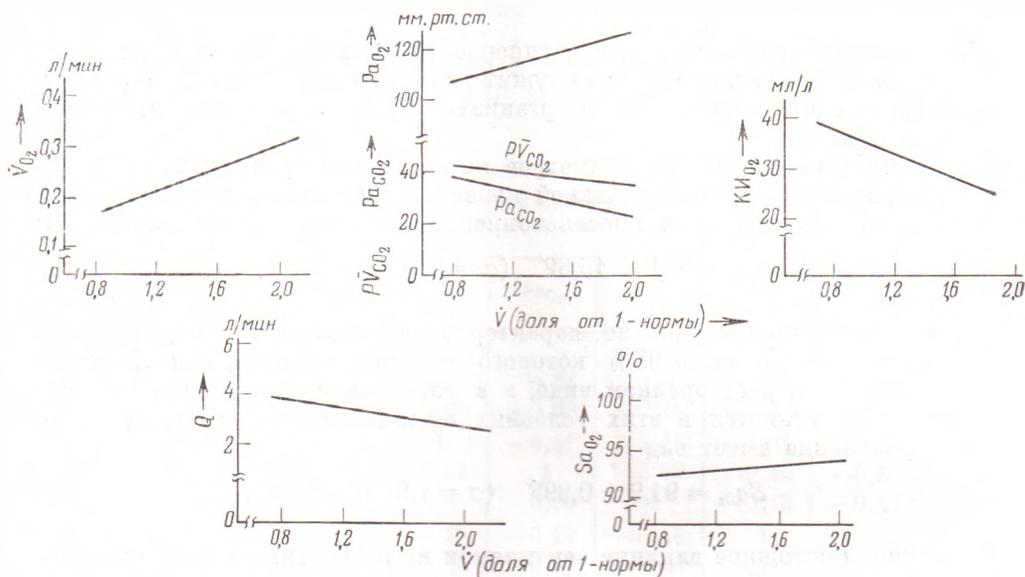


Рис. 1. Изменения параметров системы транспорта газов при различных заданных режимах вентиляции (за единицу \dot{V} принят нормальный минутный объем дыхания). Обозначения см. в тексте

и нашло отражение в приведенных уравнениях. Конечно, приведенные зависимости имеют место лишь в исследованных нами реальных диапазонах изменений вентиляции, хотя и допускают некоторую экстраполяцию за эти рамки.

Использованный в работе методический прием оказался полезным для количественной оценки сдвигов параметров транспорта газов при произвольных изменениях уровня легочной вентиляции у человека. Нам представляется, что расширение диапазона возмущающих факторов, применяемых для изучения системы дыхания, может существенно увеличить объем получаемой информации о закономерностях функционирования различных звеньев этой системы.

Институт физиологии им. И. П. Павлова
Академии наук СССР
Ленинград

Поступило
21 III 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ И. С. Бреслав, Н. А. Кариев, А. М. Шмелева, Физiol. журн. СССР, 52, 12, 1768 (1971). ² Д. М. Гедеваншвили, Сборн. докл. VI Всесоюзн. съезда физиол., биохим. и фармакол., М., 1937, стр. 682. ³ В. Н. Соловьев, Матер. X Всесоюзн. научн. конфер. по физиол., морфол., биомеханике и биохимии мышечн. деят., 2, М., 1968, стр. 88. ⁴ В. И. Страшнов, Сборн. Функция внешнего дыхания в измененной газовой среде, Л., 1971, стр. 34. ⁵ A. Arias, Rev. Clin. Espan., 114, 3, 209 (1969). ⁶ N. S. Cherniack, G. S. Longobardo, Physiol. Rev., 50, 2, 196 (1970). ⁷ C. R. Collier, J. Appl. Physiol., 9, 1, 25 (1956). ⁸ E. P. Didier, Chest, 58, 4, 423 (1970). ⁹ A. B. Otis, W. O. Fenn, H. Rahn, J. Appl. Physiol., 2, 4, 592 (1950). ¹⁰ J. E. Remmers, J. G. Brooks, S. M. Tenney, Respirat. Physiol., 4, 1, 78 (1968).