

УДК 612.261.273.2

В. А. Березовский, В. Ю. Горчаков, Ю. И. Петунин, Л. И. Якут

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ЛЕГКИХ НА МАССОПЕРЕНОС КИСЛОРОДА

Проведенными ранее исследованиями показано, что при адаптации организма к длительному пребыванию в условиях низкого парциального давления кислорода происходит повышение поверхностной активности экстрактов ткани легких [2]. Известно, что поверхностноактивные вещества легких (ПАВ_л) являются сложным липопротеидным комплексом и осуществляют несколько физиологических функций: снижают поверхностное натяжение альвеол и уменьшают работу, необходимую для растяжения легких на вдохе; стабилизируют состояние альвеолы и противодействуют спадению на выдохе; противодействуют трансудации жидкой части крови в альвеолярное пространство [11, 13]. Есть основания полагать, что ПАВ_л осуществляют еще одну функцию — влияют на массоперенос кислорода через аэрогематический барьер легких [3, 9].

Для проверки этого предположения проведены исследования массопереноса кислорода через осадочные пленки, сформированные из ПАВ_л.

Методика исследований

Экспериментальное моделирование транспорта кислорода через границу раздела фаз. ПАВ_л экстрагировали из легких белых крыс линии Вистар весом 120—160 г. Экстракцию ПАВ_л для одной пробы проводили из 50 мг легкого, что позволяло получать от 20 до 30 навесок из легких одной крысы. Для этого 50 мг ткани легкого гомогенизировали и смешивали с 25 мл 0,9% раствора NaCl, после чего смесь центрифугировали 10 мин при 900 g. Надосадочную жидкость центрифугировали повторно при 65 000 g в течение часа. Осадок переносили в 14 мл 0,9% раствора NaCl и встряхивали на аппарате В-1 на протяжении 10 мин. Все эти операции выполняли при температуре 0°С.

Динамику массопереноса кислорода через осадочные пленки ПАВ_л исследовали в полярографической ячейке диаметром 50 мм, которую заполняли 14 мл 0,9% раствора NaCl. При этом рабочий электрод погружался в жидкость на 0,1 мм. Крышка ячейки толщиной 5 мм имела 50 отверстий диаметром 2 мм. На внутренней стороне крышки приклеивали фильтровальную бумагу для устранения возможности перемешивания жидкости под влиянием газового потока. Ячейку помещали в газовую камеру, через которую пропускали увлажненный и термостатированный кислород со скоростью 1 л/мин. Избыточность подачи обеспечивала равномерное поступление кислорода во всех точках газовой камеры. Изменения концентрации кислорода на глубине погружения электрода измеряли открытым состаренным платиновым электродом в стеклянной изоляции в паре с Ag/AgCl электродом. Диффузионный ток регистрировали на полярографе ЛП-60 [3].

Кинетику транспорта кислорода к электроду исследовали в трех модельных системах: 1) газ / 0,9% раствор NaCl / рабочий электрод; 2) газ / ПАВ_л / 0,9% раствор NaCl / слой ПАВ_л / рабочий электрод; 3) газ / монослой окисленных ПАВ_л / 0,9% раствор NaCl / слой окисленных ПАВ_л / рабочий электрод.

Как было показано ранее [3], во втором и третьем случае ПАВ_л, адсорбированные на поверхности раздела фаз газ/жидкость, практически не оказывают влияния на транспорт кислорода, в то время как пленка, адсорбированная на разделе фаз жидкость/металл, оказывает существенное влияние на доставку кислорода к поверхности

электрода. Раствор ПАВ_д наливали в ячейку и экспонировали на антивибрационном основании 30 мин до начала измерений. За это время раствор нагревался до температуры опыта и на разделах фаз происходила самопроизвольная адсорбция поверхностно-активных веществ, которая контролировалась по изменению предельного тока индикаторного электрода.

Математическое моделирование транспорта кислорода через многослойные системы. Двухфазные системы. Предположим, что изучаемая система имеет две фазы, разделенные границей, например, слой воздуха над жидкостью (рис. 1, А). Обозначим через C концентрацию кислорода в первой фазе, которую будем считать постоянной во времени и не зависящей от точки измерения. Концентрацию кислорода во второй

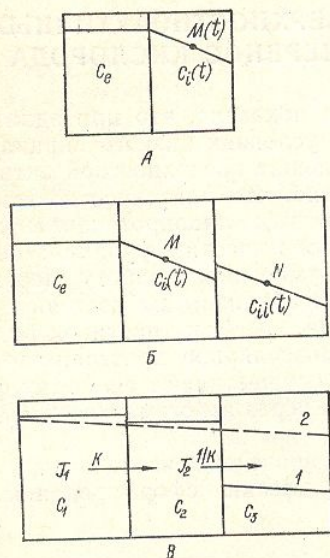


Рис. 1. Схема модельных систем для изучения диффузии кислорода А — двухфазная система; Б — трехфазная система; В — изменение профиля концентрации кислорода в трехфазной системе в зависимости от изменения коэффициента распределения.

Рис. 2. Кинетика скорости входа кислорода в осадочные пленки, сформированные из

I — свежеприготовленного раствора ПАВ_д; II — раствора окисленных ПАВ_д; III — чистый физиологический раствор.

фазе будем считать зависящей от времени и точки: пусть $C(M, t)$ — концентрация кислорода в точке M в момент времени t . Если в первоначальный момент времени $t=0$, концентрация кислорода во второй фазе C меньше, чем концентрация в первой фазе, то начнется процесс диффузии кислорода; количественное описание процесса диффузии выражает закон Фика, относящийся к простой диффузии растворенного в гомогенной среде вещества.

Рассмотрим произвольную внутреннюю точку $M(x, y, z)$ второй фазы; пусть S — поверхность уровня концентрации, проходящая через точку M . Выберем на S бесконечно малую площадку dS , содержащую точку M , так чтобы градиент концентрации во всех точках dS принимал значения, почти не отличающиеся от значения в точке M . Обозначим через $m(t)$ количество растворенного вещества (кислорода), диффундирующего через площадку dS за время t . Тогда, как утверждает первый закон Фика, диффузия происходит вдоль градиента концентрации $\text{grad } C(x, y, z)$, причем:

$$\frac{dm(t)}{dt} = -D dS \text{ grad } C(x, y, z), \quad (1)$$

где D — множитель, называемый коэффициентом диффузии (здесь через dS ради краткости обозначена площадь поверхности). Если перейти теперь от векторов $\frac{dm(t)}{dt}$ градиент C к

скалярным величинам и обозначить д...
вами, то закон диффузии Фика (1) п

$$\frac{dm(t)}{dt}$$

Подсчитаем значения градиент...
что первоначальный момент време...
также является постоянной величи...
смотрим несколько идеализирован...
раздела фаз — плоскость. Пусть C_e ...
центрации S представляет собой...
через l расстояние от точки до гра...
 S в точке M и u . Произвольная то...
Так как вторая фаза является го...
правления нормали N изменяется п

$C(u)$

Как известно из математиче...
от концентрации по направлению н

grad

Подставляя найденные выражени...

$$\frac{dm}{dt}$$

или, обозначая числовой коэффици...
последнего равенства, через α , име

Уравнение (6) получено при ус...
первой и во второй фазе одина...
циенты растворимости, то в ста...
фазы во вторую равен потоку ди

рода C_e C_i в этих фазах будут ра

Поэтому мы, следуя Рашевском

Концентрация кислорода в...
 $= \lambda m(t)$, в то время как конц...
ставляя значения C_i в уравнение

$$\frac{dm}{dt}$$

Полагая $\alpha K l \approx \beta$, имеем

Уравнение (8) представляет...
с постоянными коэффициентами...
вид (5), $m(t) = Ae^{-\beta t + b} + B$,
где A, B — коэффициенты. Для...
разделить на два класса: в перв

* Это обеспечивается мето

брационном
до темпе-
ния поверх-
ного тока

ые системы.
две фазы.
Обозначим
постоянной
во второй

скалярным величинам и обозначить длины векторов $\frac{dm(t)}{dt} \text{ grad } C$ теми же самыми буквами, то закон диффузии Фика (1) примет вид:

$$\frac{dm(t)}{dt} = DdS \text{ grad } C(x, y, z). \quad (2)$$

Подсчитаем значения градиента концентрации $\text{grad } C(x, y, z)$ в предположении, что первоначальный момент времени $t=0$, концентрация $C_i(M, O)$ во второй фазе также является постоянной величиной, не зависящей от точки M . Кроме того, мы рассмотрим несколько идеализированную модель, считая, что первая и вторая границы раздела фаз — плоскость. Пусть $C_i < C_e$; можно доказать, что поверхность уровня концентрации S представляет собой плоскость, проходящую через точку M . Обозначим через l расстояние от точки до границы раздела фаз. Пусть N — нормаль поверхности S в точке M и u . Произвольная точка нормали N , отстоящая от M на расстоянии $u < l$. Так как вторая фаза является гомогенной средой, то концентрация $C(u)$ вдоль направления нормали N изменяется по линейному закону

$$C(u) = C_i + \frac{u}{l} (C_e - C_i). \quad (3)$$

Как известно из математического анализа, градиент представляет произвольную от концентрации по направлению нормали поверхности уровня, поэтому

$$\text{grad } C = \frac{dC(u)}{du} = \frac{C_e - C_i}{l}. \quad (4)$$

Подставляя найденные выражения для $\text{grad } C$ в уравнение (2), получим

$$\frac{dm(t)}{dt} = \frac{D}{l} dS (C_e - C_i), \quad (5)$$

или, обозначая числовой коэффициент, стоящий перед множителем $C_e - C_i$ в правой части последнего равенства, через α , имеем

$$\frac{dm(t)}{dt} = \alpha (C_e - C_i). \quad (6)$$

Уравнение (6) получено при условии, что коэффициент растворимости кислорода в первой и во второй фазе одинаковые. Если указанные фазы имеют разные коэффициенты растворимости, то в стационарном режиме, когда поток диффузий из первой фазы во вторую равен потоку диффузий в обратном направлении, концентрации кислорода C_e C_i в этих фазах будут различны, так что $\frac{C_e}{C_i} = K$ ($K \neq 1$), $C_e = KC_i$.

Поэтому мы, следуя Рашевскому [12], внесем дополнение в уравнение (6), полагая

$$\frac{dm}{dt} = \alpha (C_e - KC_i). \quad (7)$$

Концентрация кислорода в точке M пропорциональна $m(t)$, следовательно $C_i = \lambda m(t)$, в то время как концентрация кислорода в первой фазе постоянна*. Подставляя значения C_i в уравнение (7), получим

$$\frac{dm(t)}{dt} = -\alpha K \lambda m(t) + \alpha C_e. \quad (8)$$

Полагая $\alpha K \lambda = \beta$, имеем $\frac{dm(t)}{dt} = \beta m(t) + C$.

Уравнение (8) представляет собой простейшее линейное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами. Общее решение этого дифференциального уравнения имеет вид (5), $m(t) = Ae^{-\beta t + b} + B$, где A, B — коэффициенты. Для наших целей общее решение этого уравнения удобно разделить на два класса: в первый класс мы отнесем решения вида

$$m(t) = e^{-\beta t + b} + B, \quad (9)$$

* Это обеспечивается методикой эксперимента.

I

II

III

IV

V

VI

VII

VIII

концентрация
времени $t=0$,
первой фазе,
а диффузии
гомогенной

пусть S —
 S бесконеч-
ности во всех
 M . Обозна-
дирующего
диффузия

(1)

и краткости

градиент C к

которые описывают выход кислорода из второй среды в первую, а второй класс состоит из решений

$$m(t) = -e^{-\beta t + b} + B = B - e^{-\beta t + b}, \quad (10)$$

которые описывают процесс входа кислорода из первой фазы во вторую.

Трехфазные системы. Рассмотрим процесс диффузии кислорода в трехфазных системах с четко выраженными границами фаз (рис. 1, Б). В условиях нашего эксперимента, первая фаза представляет воздушную среду, вторая фаза — 0,9% раствор NaCl и третья фаза слой ПАВ_л на поверхности электрода. Как и ранее, будем предполагать, что концентрация кислорода в первой фазе C постоянна (не зависит от времени и точки в пространстве первой фазы). Обозначим через $C_i(t)$ концентрацию кислорода внутри второй фазы в некоторой точке M , а через $C_{ii}(t)$ — концентрацию кислорода в какой-либо точке N третьей фазы. Дифференциальное уравнение, описывающее закон изменения концентрации кислорода в точке M , имеет вид, аналогичный (7), однако здесь необходимо заменить C_e на C_i , C_i на C_{ii} , а коэффициент K — на некоторый коэффициент γ , показывающий различие коэффициентов растворимости кислорода в фазах II и III. Мы получим дифференциальное уравнение

$$\frac{dm(t)}{dt} = \alpha(C_i - \gamma C_{ii}). \quad (11)$$

Так как $C_{ii}(t)$ пропорционально $m(t)$, а $C_i(t) = Ae^{-\beta t + b} + B$, то уравнение (9) примет вид:

$$\frac{dm(t)}{dt} = -\delta m(t) + Ae^{-\beta t + b} + B.$$

Общее решение уравнения (10) представлено в форме

$$m(t) = A_1 e^{-\delta t} + B_1 e^{-\beta t} + C_1,$$

где A , B , C — числовые коэффициенты (5). Коэффициент β пропорционален коэффициенту растворимости кислорода во втором слое (фаза II), а коэффициент δ — коэффициенту растворимости в фазе III. В условиях нашего эксперимента, как было указано ранее, второй слой представляет собой 0,9% раствора NaCl, а третий — слой ПАВ_л. Как известно [8], коэффициент растворимости кислорода в липидной фазе ПАВ_л приблизительно в четыре раза больше, чем в воде, поэтому при небольших значениях t экспонента $He^{-\beta t}$ сохраняет почти постоянное значение, близкое к единице. Отсюда следует, что частное решение дифференциального уравнения (10), которое получается при количественном описании транспорта кислорода в данной ситуации, можно с достаточной степенью точности приблизить экспоненциальной кривой

$$m(t) = A_1 e^{-\delta t} + B_1 e^{-\beta t} + C_1 \approx A_1 e^{-\delta t} + L,$$

где $L = B_1 + C_1$. Так как в наших экспериментах осуществляется процесс входа кислорода из первой фазы во вторую и третью фазу рассматриваемой составной системы (рис. 1, Б), то, в силу указанной классификации, множество решений уравнения диффузии $m(t) = Ae^{-\delta t} + L$ можно представить в виде $m(t) = L - e^{\nu_1 t + \nu_0}$, где $\nu_1 = -\delta$, $\nu_0 = \ln A$. Вычитая из константы L значения $m(t)$ и логарифмируя полученные выражения, мы приходим к линейной функции относительно t : $y(t) = \ln[L - m(t)] = \nu_1 t + \nu_0$.

Зная экспериментальные значения функции $y(t)$ в фиксированные моменты времени, мы можем вычислить значения параметров ν_1 и ν_0 по схеме линейной регрессии методом наименьших квадратов [1]. Тогда доверительные границы $\nu_i^{(H)}$, $\nu_i^{(B)}$ для параметра ν_i ($i = 1, 2$), отвечающее уровню значимости β , определяются по формуле $\nu_i^{(H)} = \nu_i - t_{\beta} S_{\nu_i}$, $\nu_i^{(B)} = \nu_i + t_{\beta} S_{\nu_i}$, где t_{β} — двухсторонняя доверительная граница распределения Стьюдента с $n = 2$ степенями свободы, соответствующая уровню значимости $p = 0,01$.

Результаты исследований и обработка полученных данных

Результаты измерений концентрации кислорода на глубине погружения электрода в присутствии ПАВ_л представлены на рис. 2. Из графика видно, что скорость нарастания концентраций кислорода для свежеприготовленного ПАВ_л с первых секунд больше, чем в 0,9% растворе NaCl. Кроме того, представленный график дает возможность пред-

положить, что степень окислительного влияния на массопотребителю.

Значение параметра ν_1 и вы свежеприго

№ измерения	0,9 % раствор	
	ν_1	S_{ν_1}
1	-0,467	0,013
2	-0,141	0,002
3	-0,364	0,005
4	-0,377	0,003
5	-0,329	0,030
6	-0,389	0,011
7	-0,317	0,007
8	-0,293	0,006
9	-0,369	0,002
10	-0,341	0,002
11	-0,352	0,004
12	-0,091	0,001
13	-0,185	0,001
14	-0,259	0,003
15	-0,101	0,003
16	-0,176	0,005
17	-0,103	0,003
18	-0,087	0,003
19	-0,324	0,006
Среднее	-0,266	

Для наших целей наибольшее значение параметра ν_1 , входящего в формулу (1), не пропорционален коэффициенту диффузии в фазе. Поэтому для каждого измерения $\nu_i^{(K)}$ (K — номер замера) и его стандартных расхождений $S_{\nu_i^{(K)}}$ по среднему значению параметра $\nu_i^{(K)}$ по-

$J_1 =$

Оценку для дисперсии S_{ν_1} и

Доверительные границы ν_1 находили с помощью правил Стьюдента. Верные доверительные г

положить, что степень окисленности ПАВ_л может оказывать существенное влияние на массоперенос кислорода из жидкой фазы к его потребителю.

Значение параметра v_1 и выборочной дисперсии S_1 для 0,9 % раствора NaCl свежеприготовленного и окисленного ПАВ_л

№ измерения	0,9 % раствор		Свежеприготовленный ПАВ _л		Окисленный ПАВ _л	
	v_1	S_1	v_1	S_1	v_1	S_1
1	-0,467	0,013	-0,570	0,033	-0,130	0,001
2	-0,141	0,002	-0,358	0,011	-0,244	0,004
3	-0,364	0,005	-0,468	0,006	-0,261	0,004
4	-0,377	0,003	-0,520	0,014	-0,220	0,007
5	-0,329	0,030	-0,412	0,012	-0,092	0,001
6	-0,389	0,011	-0,418	0,004	-0,196	0,002
7	-0,317	0,007	-0,547	0,028	-0,204	0,003
8	-0,293	0,006	-0,457	0,007	-0,352	0,003
9	-0,369	0,002	-0,391	0,004	-0,062	0,002
10	-0,341	0,002	-0,344	0,005	-0,059	0,004
11	-0,352	0,004	-0,410	0,004	-0,103	0,002
12	-0,091	0,001	-0,288	0,007		
13	-0,185	0,001	-0,292	0,003		
14	-0,259	0,003	-0,251	0,009		
15	-0,101	0,003	-0,291	0,003		
16	-0,176	0,005	-0,332	0,006		
17	-0,103	0,003	-0,254	0,006		
18	-0,087	0,003	-0,349	0,006		
19	-0,324	0,006	-0,304	0,005		
Среднее	-0,266		-0,382		-0,144	

Для наших целей наибольший интерес представляют расчеты значения параметра v_i , входящего в формулу (11), так как он по абсолютной величине пропорционален коэффициенту растворимости кислорода в исследуемой фазе. Поэтому для каждого замера P_{O_2} находили значения параметра $v_i^{(K)}$ (K — номер замера) и его выборочной дисперсии $S_i(t)$. Результаты этих статистических расчетов представлены в таблице. Затем производилось усреднение параметра $v_i^{(K)}$ по верхнему индексу K

$$J_1 = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n v_i^{(K)} \quad (n = 19, 11)$$

Оценку для дисперсии S_1 параметра $\bar{v}_1$ определяли по формуле:

$$\bar{S}^2 = \frac{1}{n^2} \sum_{n=1}^n [S_1^{(K)}]^2.$$

Доверительные границы для усредненного значения параметра находили с помощью правила $3S$ [7]; $v_i \pm 3S$, которое дает более достоверные доверительные границы, отвечающие 5% уровню значимости

по сравнению с критерием Стьюдента (критерий Стьюдента можно применять лишь для нормального распределения выборочных значений, в то время как правило $3S$ имеет силу для любого одномодального распределения [4]). Для 0,9% раствора NaCl среднее значение $\bar{v}_1$ оказалось равным $-0,266$, а доверительные границы равны $-0,273$; $-0,260$. Усредненное значение $\bar{v}_1$ для свежеприготовленного ПАВ_л равно $-0,382$, а доверительные границы $-0,390$; $-0,373$. Наконец, при введении в систему пленки окисленного ПАВ_л v_1 равняется $-0,144$, а доверительные границы $-0,147$; $-0,141$. Анализ усредненных значений v_1 и их доверительных границ показывает значимое увеличение коэффициента растворимости кислорода в осадочной пленке из свежеприготовленного ПАВ_л по сравнению с 0,9% раствором NaCl, так как доверительные интервалы для параметра v_1 для свежеприготовленного ПАВ_л и 0,9% растворе NaCl не пересекаются, а значение v_1 в первом случае по абсолютной величине больше, чем во втором. Коэффициент растворимости кислорода в окислительной форме ПАВ_л, в силу аналогичных рассуждений, значимо уменьшается по сравнению с соответствующим показателем для 0,9% раствора NaCl и примерно в три раза меньше коэффициента растворимости в свежеприготовленном ПАВ_л.

Проверка полученных результатов

Для контроля точности и надежности указанного метода вычисления параметров и их доверительных границ аналогичные вычисления были проведены другим способом, сущность которого заключается в следующем. Полученные в разных опытах замеры концентраций кислорода $m^{(K)}(t)$ ($K=1, 2 \dots n$; $n=11, 19$) усреднялись так, что получалась средняя кривая изменений концентрации кислорода с течением времени:

$$\bar{m}(t) = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n m^{(K)}(t).$$

Затем усредненная кривая $\bar{m}(t)$ была подвергнута статистической обработке, описанной в предыдущем пункте, с целью получения параметров v_1 и v_0 и их доверительных границ, отвечающих 5% уровню значимости. Для 0,9% раствора NaCl $v_1 = -0,247$; $S_1 = 0,001$; $v_0 = 6,159$; $S_0 = 0,002$, доверительные границы, построенные по правилу $3S$, соответственно равны $-0,247 \pm 0,003$; $6,159 \pm 0,006$; для свежеприготовленного ПАВ_л $v_1 = 0,371$; $S_1 = 0,002$; $v_0 = 6,109$; $S_0 = 0,003$; доверительные границы для v_1 и v_0 равны $-0,371 \pm 0,006$; $6,109 \pm 0,009$; наконец, для окисленного ПАВ_л $v_1 = -0,135$; $S_1 = 0,001$; $v_0 = 6,188$; $S_0 = 0,001$, а соответствующие доверительные границы равны $-0,135 \pm 0,003$; $6,188 \pm 0,003$. Сравнивая эти значения параметров и их доверительные границы с соответствующими значениями, вычисленными по первому способу, мы наблюдаем крайне незначительное расхождение полученных результатов, что свидетельствует об их достаточно высокой точности и надежности. Кроме того, малые значения выборочных средних квадратических отклонений S_1 и S_0 , представленные в таблице и в тексте статьи, указывают, что аппроксимация экспериментальных кривых экспоненциальными функциями имеет высокую точность. Анализируя данные, полученные вторым методом, путем усреднения кривых

изменения концентрации кислорода во всех трех случаях ПАВ_л оказывается, что ПАВ_л, что свидетельствует о осуществлении

Из полученных результатов не встречается сопротивление пленки, но имеют высоким диффузионным разрешением этого процесса на рис. 1, В. Массоперенос ложится на два потока III. При этом толщина не перемешиваемого потока (6),

$$J_1 =$$

$$J_2 =$$

где: K — коэффициент, Π , и $\frac{1}{K}$ — коэффициент, III, при учете, что коэффициенты III равны. D — коэффициент

При $J_1 = J_2$, K (C

Из полученного графика концентрации кислорода до концентрации описывается коэффициентом растворимости будет приближаться к 2 (рис. 1, В).

Предложенная модель сопротивления потоку этой модели по растворимости кислорода регулирующим посту

1. Поверхностный перенос кислорода в с
2. Изменение скорости массопереноса кислор

1. Белошицкий П. В., И перограм. — Физиол. ж
2. Березовский В. А., Готивных веществ легки поверхность-активных

изменения концентрации кислорода, мы также наблюдаем значимые отклонения коэффициента γ_1 , характеризующего транспорт кислорода во всех трех случаях, причем величина γ_1 для свежеприготовленных ПАВ_л оказывается примерно в три раза больше, чем для окисленных ПАВ_л, что свидетельствует о большом значении исходного состояния ПАВ_л для осуществления массопереноса кислорода.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что кислород не встречает сопротивления при входе в фосфолипидные или липопротеидные пленки, но это противоречит данным о том, что они обладают высоким диффузионным сопротивлением потоку кислорода [9]. Для разрешения этого противоречия рассмотрим систему В, показанную на рис. 1, В. Массоперенос кислорода из фазы I в фазу III можно разложить на два потока. Поток из фазы I в фазу II и из фазы II в фазу III. При этом толщину фазы I и фазы III примем равной Δx (толщина неперемешиваемого водного слоя), тогда, используя уравнения потока (6),

$$J_1 = \frac{dm(t)}{dt} = KD \frac{dC'}{dx} dC' = (C_1 - C_2)$$

$$J_2 = \frac{dm(t)}{dt} = \frac{1}{K} D \frac{dC''}{dx} dC'' = (C_2 - C_3),$$

где: K — коэффициент распределения при диффузии из фазы I в фазу II, и $\frac{1}{K}$ — коэффициент распределения при диффузии из фазы II в фазу III, при учете, что коэффициенты растворимости кислорода в фазе I и III равны. D — коэффициент диффузии кислорода в водной среде.

$$\text{При } J_1 = J_2, K(C_1 - C_2) = \frac{1}{K}(C_2 - C_3); \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_3} = \frac{1}{K^2}.$$

Из полученного уравнения следует, что основной перепад концентрации кислорода должен быть на разделе фаз II и III. Профиль концентрации описывается кривой 1 (рис. 1, В). При уменьшении коэффициента растворимости кислорода в фазе II коэффициент распределения будет приближаться к единице, а профиль концентраций к прямой 2 (рис. 1, В).

Предложенная модель может объяснить причину возникновения сопротивления потоку кислорода на мембране. Кроме того, исследование этой модели позволяет высказать предположение, что изменение растворимости кислорода в материале пленки может быть фактором, регулирующим поступление кислорода в клетку.

Выводы

1. Поверхностноактивные вещества легких увеличивают массоперенос кислорода в системе жидкость /ПАВ_л/ потребитель кислорода.
2. Изменение степени окисленности ПАВ_л оказывает влияние на массоперенос кислорода через осадочные пленки.

Литература

1. Белошицкий П. В., Петунин Ю. И., Якут Л. И. Математичні методи аналізу хроноамперограм.— Фізіол. журн. АН УРСР, 1974, 20, № 4, с. 527—533.
2. Березовский В. А., Горчаков В. Ю. К вопросу об адаптивной роли поверхностно-активных веществ легких.— В кн.: Всесоюзный симпозиум: «Физиологическая роль поверхностно-активных веществ», 1975, Черновцы, с. 16—17.

3. Березовский В. Я., Горчаков В. Ю., Сушко Б. С. Кинетика транспорта кислорода кризис осадочных фосфолипидных пленок.— Физиол. журн. АН УССР, 1975, 23, с. 641—643.
4. Высочанский Д. О., Петунин Ю. И. Обоснование правил ЗС для одномодальных распределений.— Теория вероятности и математическая статистика. Киев, 1978, с. 23—25.
5. Горптон Фрай. Элементарный курс дифференциальных уравнений.— М.—Л., 1933.—196 с.
6. Нобел П. Физиология растительной клетки.— М.: Мир, 1973.—264 с.
7. Петунин Ю. И., Севбо И. Л. Исследование синтаксических структур статистическими методами. Киев, 1976, 2, сер. 2, с. 17—36.
8. Battino R., Evans F. D., Dongarh W. F. The solubilities of seven gases in olive oil with reference to theory of transport through the cell membrane.— J. Amer. Oil Chem. Soc., 1968, 45, p. 830—833.
9. Econow B., Balagot R. S., Santelices V. Possible role of alveolar surfactants in the uptake of inhaled gases.— Nature, 1963, 197, N 4871, p. 1400—1402.
10. Mac Dongall J. D., Mac Cabe M. Diffusion coefficient of oxygen through tissues.— Nature, 1967, 215, N 5107, p. 1173—1176.
11. Pattle R. E. Surface lining of lung alveoli.— Physiol. Rev., 1965, 45, N 1, p. 48—79.
12. Rashewsky N. Mathematical biophysics: physico-mathematical foundations of biology.— New York, 1960.—460 p.
13. Scorpelli E. M. The surfactant system of the lung.— Philadelphia. 1968.—280 p.

Институт физиологии им. А. А. Богомольца
АН УССР, Киев; Киевский государственный университет;
Киевский политехнический институт

Поступила в редакцию
12.IV 1978 г.

V. A. Berezovsky, V. Yu. Gorchakov, Yu. I. Petunin, L. I. Yakut

STUDIES OF THE LUNG SURFACE-ACTIVE SUBSTANCES EFFECT ON OXYGEN MASS TRANSFER

Summary

The oxygen diffusion from solution to electrode through the deposited films formed from the fresh-prepared and oxidized surface-active substances of the lung was studied by means of special polarographic cell. When using the oxidized surface-active substances of the lung for preparing the deposited films the rate of oxygen delivery to electrode lowers considerably, that is explained by a change in oxygen solubility in the deposited film. To examine this assumption a mathematical model of oxygen diffusion in the heterogeneous medium was created, which takes into account oxygen solubility at different stages. When substituting the experimental data to the mathematic model it was established that the oxygen solubility coefficient in the oxidized active-surface substances of the lung is three times as low as in the fresh-prepared, which affected the rate of oxygen mass transfer in the system.

Department of Physiology of Respiration,
A. A. Bogomoletz Institute of Physiology,
Academy of Sciences, Ukrainian SSR, Kiev

УДК 612.202

В. А. Березовский,

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Концентрация кислорода основными механизмами его. При возрастании концентрации ступает большее его количество обусловлено увеличением приводит к увеличению обеспечивающие доставку ткани живых организмов транспорту кислорода, по составу и структуре кислорода может во митохондриальной мембране клеток.

Мы изучали распределение кислорода (*Misgurnus fossilis*) и массоперенос его внутри

Распределение кислорода с помощью платиновых микроэлектродов оболочки потока осуществляли сравнением кислорода (P_{O_2}), создаваемого

рода, рассчитанным по закону Фика. Икру для опытов получали искусственно [3].

При попадании икринок в желток между желтком и икринкой кислород диффундирует, затем проходит через оболочку и в цитоплазму, где происходит окисление.

Отделившаяся оболочка икринки от цитоплазмы икринки от кончиков создаются условия для измерений использовали икринки. Диаметр их составлял 1,2 мм. В отличие от неоплодотворенного перивителлинового пространства.

В опытах икринки расщепляли боковой непроточной камерой с термостатом. Камеру посредством референтным электродом. Рядом с икринкой под микроскопом над икринкой либо по экспериментальному профилю на