



Российская академия наук
Институт биохимии им. А. Н. Баха
ГНЦ РФ — Институт медико-биологических проблем
Национальная академия наук Армении
Объединенный институт ядерных исследований

**«ПРОБЛЕМЫ БИОХИМИИ, РАДИАЦИОННОЙ
И КОСМИЧЕСКОЙ БИОЛОГИИ»**

**II Международный симпозиум под эгидой ЮНЕСКО,
посвященный памяти академика Н. М. Сисакяна,
и II СИСАКЯНОВСКИЕ ЧТЕНИЯ**

Москва, Дубна, 29 мая – 1 июня 2001 г.

Труды

Том I

**«PROBLEMS OF BIOCHEMISTRY, RADIATION
AND SPACE BIOLOGY»**

**II International symposium under the auspice of UNESCO
dedicated to the memory of academician N. Sissakian
and II SISSAKIAN READINGS**

Moscow, Dubna, 29 May – 1 June 2001

Proceedings

Volume I

ГАЗООБМЕННЫЕ ДИФFUЗИОННЫЕ АППАРАТЫ НА ТРЕКОВЫХ МЕМБРАНАХ. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

М. В. Ковальчук³, Е. А. Красавин², В. И. Кузнецов¹, Б. В. Мчедlishvili³,
А. Н. Сисакян², В. Д. Шестаков¹, Б. И. Фурсов⁴

¹Исследовательский центр прикладной ядерной физики, Дубна..

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

³Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН, Москва

⁴ГНЦ – Физико-энергетический институт, Обнинск

За последнее время при научно-технической и организационной поддержке Минатома РФ и Объединенного института ядерных исследований развиты работы по физическим основам и ОКР по применению газообменных диффузионных аппаратов. Газообменное диффузионное устройство (ГОДУ), а мы будем говорить о ГОДУ на трековых мембранах, в простейшем варианте представлено на рис. 1.

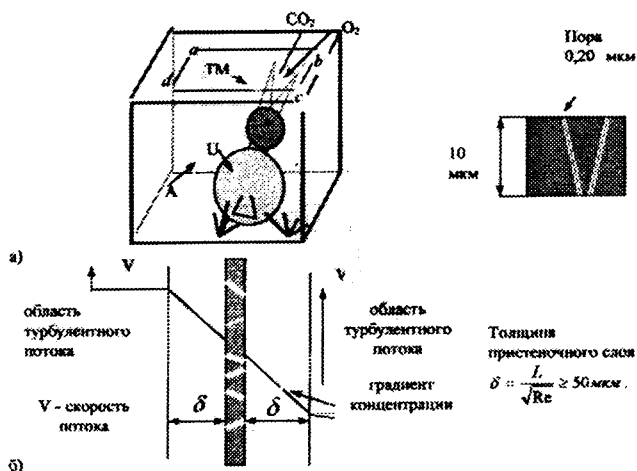


Рис.1. а) свободный (конвективный) газообмен; б) газообмен при обтекании мембраны воздушным потоком

Здесь A – объем, связанный с внешним пространством только трековой мембраной (ТМ) $abcd$, U – потребитель кислорода и генератор углекислого газа. Оптимальные диаметры мембранных пор газообменных аппаратов лежат в интервале от 0,15 до 0,20 мкм. Пористость мембраны [1] $\Pi \sim 10-15\%$ (пористость – доля в процентах, приходящаяся на площадь отверстий пор на единицу площади мембраны). Толщина производимых ТМ от 10 до 40 мкм. При таких характеристиках сопротивление диффузии мембранных пор не сказывается существенно на сопротивлении мембраны диффузионному потоку. Главную часть сопротивления создают воздушные слои у стенок мембраны. Скорость диффузии определяется градиентом концентрации данной компоненты (см. рис. 1) [2]. Скорость газообмена при данной пористости мембраны практически не зависит

от диаметра пор, если в них газ протекает в вязкостном режиме, т.е. при условии, когда длина свободного пробега газовой молекулы λ в несколько раз меньше диаметра мембранных пор. Например, $\lambda = 0,069$ мкм при давлении воздуха 0,1 МПа (практически равном атмосферному давлению при нормальных условиях). Схема диффузионного газообмена через трековые мембраны во многом аналогична газообмену живых организмов (рис. 2).

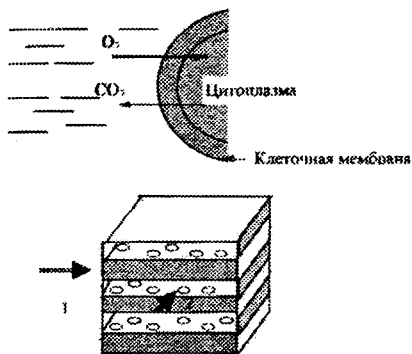


Рис. 2. а) диффузионный газообмен в процессе дыхания простейших; б) газообмен в диффузионном аппарате: 1 и 2 – скрещивающиеся потоки

У таких водных животных, как туфелька или амеба, кислород, растворенный в воде, диффундирует непосредственно через плазматические мембраны, формирующие их тела, внутрь клетки, а диоксид углерода – наружу. Газообмен млекопитающих животных происходит в сложной дыхательной системе, в конечном итоге сквозь альвеолярные мембраны. Площадь альвеолярных мембран человека в 50 раз превосходит площадь его кожного покрова и составляет примерно 100 м^2 [3]. Воздух в процессе газообмена обтекает поверхности альвеолярных мембран с достаточной скоростью, чтобы пристеночный слой смывался, т.е. становился тоньше. Благодаря этому возрастает интенсивность газообмена.

Наши расчеты показали, что до толщины 40 мкм сопротивление трековой мембраны вносит незначительный вклад в общее сопротивление системы пристеночный слой – мембрана – пристеночный слой даже при развитом турбулентном движении газа вдоль поверхностей мембран [4]. Отметим, что толщина альвеолярных мембран человека ~ 40 мкм. Это знаменательное совпадение с расчетной величиной, полученной для техногенных диффузионных аппаратов. Поглощение органами дыхания и клетками кислорода и выделение диоксида углерода – самый яркий пример обмена больших количеств веществ через мембраны путем чисто физического процесса диффузии. Естественно использовать этот путь в техногенных устройствах. Диффузионный обмен компонентами происходит "квасиселективно" – удаляется выделяющаяся компонента, а поглощается – потребляемая в рабочем объеме. Если пытаться поддерживать концентрацию диоксида углерода C_k в замкнутом воздушном объеме с источником CO_2 мощностью $\omega \text{ м}^3/\text{с}$, разбавляя воздух рабочего объема потоком V атмосферного воздуха с концентрацией диоксида углерода C_B , то

$$V = \frac{\omega}{C_k + C_B} \quad (1)$$

Человек при работе средней тяжести выделяет $0,02 \text{ м}^3/\text{ч}$ диоксида углерода. Если концентрация $C_k = 0,1 \%$, а $C_B = 0,03 \%$, то $V = 28 \text{ м}^3/\text{ч}$. Таким образом,

при разбавлении, в отличие от диффузионного газопереноса, для поддержания концентрации данной газовой компоненты расходуются большие объемы очищенного воздуха.

Сегодня наиболее продвинуты разработки газообменных аппаратов, предназначенных для чистых помещений высокого класса. Газообменный аппарат в виде куба $300 \times 300 \times 300$ мм, содержащий 6 м^2 полимерной мембраны с пористостью 10%, обтекаемой потоками в турбулентном режиме, обеспечивает жизнедеятельность 4-х человек в рабочем объеме чистого помещения (ЧП) при работе средней тяжести. Если диаметр пор лежит в указанном выше диапазоне, то ЧП полностью изолировано от всех бактерий и аэрозолей, содержащихся в атмосфере. Это связано не только с размерами пор, но и с особенностью движения частиц в твердых оболочках в тангенциальных потоках.

Диффузионный поток Q через мембрану площадью S определяется как [2]

$$Q = K_d \cdot (C_1 - C_2) \cdot S, \quad (2)$$

$$K_d = \frac{D_i \cdot N_u \cdot \Pi}{2\Pi d_e + N_u \cdot l}. \quad (3)$$

Здесь K_d – проводимость системы мембрана – пристеночные слои; D_i – коэффициент взаимной диффузии диоксида углерода в воздухе; Π – пористость мембраны; l – длина мембраны; d_e – эквивалентный диаметр канала, равный отношению площади его поперечного сечения к одной четверти его периметра, N_u – число Нуссельта, характеризующее интенсивность массопереноса через пристеночные слои канала данной конфигурации. Число N_u – в изотермическом режиме функция числа Рейнольдса $Re = V \cdot d_e / \nu$, где V – скорость потока, обтекающего мембраны, ν – кинематическая вязкость газа.

Следует отметить, что процесс массопереноса через трековую мембрану подобен процессу теплопередачи, так как эти явления описываются подобными уравнениями. Процесс теплопередачи характеризуется законом Фурье (4), а процесс массопереноса – законом Фика (5):

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}T, \quad (4)$$

$$q_i = -D_i \cdot \text{grad}C. \quad (5)$$

Здесь λ , T – теплопроводность и температура соответственно; D_i и C – коэффициент взаимной диффузии и распределение концентрации данной компоненты газа. Все обобщенные данные в форме критериев подобия, полученные в теплотехнических исследованиях, могут быть использованы и в задачах массопереноса. В последнем случае критерии подобия вместо теплопроводности и температуры содержат коэффициент взаимной диффузии D_i и распределение концентрации C .

ЧП с диффузионным газообменом – двухступенчатые. Первая ступень – контур: с диффузионным газообменным аппаратом, поддерживающие жизнедеятельность в рабочем объеме ЧП и изолирующие объем от проникновения аэрозолей и бактерий. Вторая ступень – контур, в котором воздух циркулирует через фильтро-поглотитель генерируемых внутри ЧП аэрозолей (см. рис. 3). Благодаря такой комбинации достигается высокий класс чистоты, значительно увеличивается срок службы поглощающего фильтра.

На принципах диффузионного газообмена могут быть построены

индивидуальные малогабаритные диффузионные газообменные респираторы. Принципиальное отличие газообменного устройства респиратора от газообменного устройства ЧП заключается в значительно большей разности концентраций диоксида углерода в воздухе наружного и внутреннего контуров (см. рис. 3).

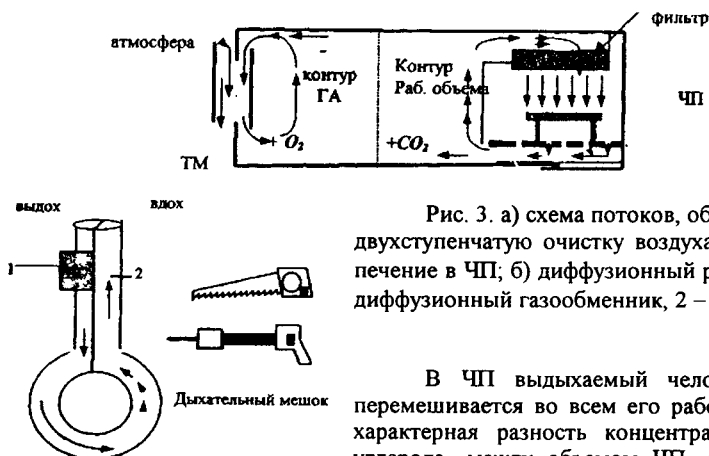


Рис. 3. а) схема потоков, обеспечивающих двухступенчатую очистку воздуха и жизнеобеспечение в ЧП; б) диффузионный респиратор: 1 – диффузионный газообменник, 2 – канал вдоха

В ЧП выдыхаемый человеком воздух перемешивается во всем его рабочем объеме и характерная разность концентраций диоксида углерода между объемом ЧП и атмосферой $\sim 0,07\%$. Выдыхаемый человеком воздух содержит $\sim 5\%$ диоксида углерода, а значит, такого же порядка и разность концентраций в нем и в воздухе в контурах газообменного устройства, если выдыхаемый воздух в процессе газообмена локализован. В диффузионном респираторе, в отличие от ЧП, локализация возможна. Таким образом, при прочих равных условиях плотность диффузионного потока в газообменной части респиратора теоретически может быть примерно в 70 раз выше, чем в диффузионном аппарате ЧП. Следовательно, особое распределение воздушных потоков даст возможность создать малогабаритное газообменное устройство, подходящее для респираторов. При таких разностях концентраций полезно организовать встречные или скрещивающиеся тангенциальные потоки выдыхаемого и атмосферного воздуха, чтобы на скорость газообмена не влияло выравнивание концентраций в каналах дыхательного и атмосферного воздуха.

Потоки в диффузионных респираторах могут быть трех типов: протекающие с помощью подъема грудины межреберными мышцами и сокращения диафрагмы; с потоками атмосферного воздуха, создаваемыми микрогазодувкой (рис. 3); с использованием газодувок для создания обоих встречных потоков.

В таких респираторах осуществляется полная защита от аэрозолей, их производительность практически не зависит от влажности окружающей среды и выдыхаемого воздуха, а сопротивление дыханию настолько мало, что не влияет на утомляемость дыхательной системы человека.

Технически проще всего осуществим второй тип распределения потоков в респираторах. Здесь легко формируется встречный газовый поток, и такие респираторы

раторы могут применяться при тяжелых работах. Однако особенно эффективен респиратор с двумя газодувками.

На поверхности ТМ относительно слабо удерживаются радиоактивные аэрозоли. Добавим, что ТМ могут промываться, а поры в тангенциальных потоках не забиваются аэрозолями, что проверено экспериментально и подтверждается теоретическими соображениями.

Применение методов диффузионного газообмена в тангенциальных потоках на трековых мембранах, несомненно, перспективно в процессах технической биохимии, скажем, при использовании живых микроорганизмов, например бактерий, в промышленных методах производства ценных продуктов. Большинство бактерий анаэробны и потребляют кислород, генерируя при этом диоксид углерода. Во многих случаях изоляция бактерий от аэрозолей внешней среды, их жизнеобеспечение, а также изоляция внешней среды от бактерий могут быть успешно осуществлены с помощью газообменных аппаратов на трековых мембранах (см. рис. 4).

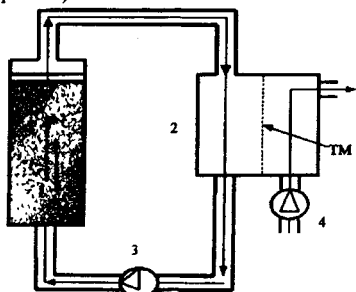


Рис. 4. Газообменный аппарат на трековых мембранах: 1 – ферментер, 2 – корпус диффузионного газообменника, 3, 4 – газодувки

ЧП с газообменным диффузионным устройством – энергосберегающее оборудование с минимальными затратами энергии на очистку воздуха, и только от аэрозолей, рождающихся в самом рабочем объеме.

ГОДУ открывают возможность создания комфортных респираторов, полностью защищающих от аэрозолей и пригодных для работы в тяжелых условиях, например при высокой влажности. Мы не сразу поняли, что сама природа идет по диффузионному пути. Нас натолкнул на этот путь опыт работы с ядерными реакторами на тепловых нейтронах. Там нейтронные диффузионные потоки и теплоотвод через пристеночные слои тепловыделяющих элементов – процессы, базирующиеся на тех же закономерностях, что и дыхание, – обеспечивают жизнеспособность ядерных котлов.

Все, что удастся рассчитать, в задачах, связанных с массопереносом, в главном покоится на экспериментальных данных, добытых при исследовании теплопередачи, вечной проблеме пристеночного слоя, трансформированных методами теории подобия для задач диффузионного газообмена.

С другой стороны, исследования пристеночных слоев измерениями концентраций газовых компонент означают новый экспериментальный подход к углублению понимания процессов "у стенки", столь важных в биологических науках, энергетике, ядерной и обычной, тепловой, и других приложениях науки к практическим нуждам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов В.И., Апелъ П.Ю. Ядерные трековые мембраны, Дубна, 1986.

2. Кузнецов В.И., Демкин В.П., Матвеев Г.Н., Шестаков В.Д. Газообменные диффузионные аппараты на трековых мембранах, М.: ЦНИИАтоминформ, 2000.
3. Green M.E., Stout G., Tailor D.J. Biological Science, Cambridge University Press, 1985.
4. Incopera P.P., De Witt D.P. Introduction to Heat Transfer, NY John Wiley and Sons, 1990.