

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

ТАДЖИКСКИЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Ш.ШОХТЕМУРА

Егибегов П. Е. Шоайдаров Н.Б.

БИОФИЗИКА КРОВИ

Душанбе - 2012

УДК 577.3

Егибеков П.Е. Шоайдаров Н.Б. Биофизика крови.
— Душанбе, 2012, 80 стр.

Рецензенты:

Рахмихудоев.Г.Р — профессор,
доктор биологических наук, ТАУ.

Файзуллоев З.Ф — доцент кафедры физики ТАУ.

Ниятбеков Т.Р — кандидат биологических наук

В книге впервые рассматриваются некоторые проблемы биофизики крови, которые считаются важными вопросами биологии и медицины. В частности теоретически дается определения массы и плотности молекулы гемоглобина. Рассматривается прочность цепочной структуры биополимера гемоглобина крови. В работе также приводятся теории распада и время жизни форменных элементов крови и явления переноса математическим аппаратом в клеточной мембране.

По нашему мнению книга должна быть интересным и может служить хорошим научным пособием для аспирантов и студентов биофизиков, биологов и медиков по данному направлению.

© Егибеков. П.Е., Шоайдаров Н.Б. 2012

*Моя вера — это вера в то, что счастье
человечеству дает прогресс науки*
И. П. Павлов

ВВЕДЕНИЕ

Двадцатый век в истории человеческой цивилизации считается как век великого революционного преобразования в обществе, науке и технике, бурного развития космонавтики, физики атома и атомного ядра, кибернетики, биофизики и многих других отраслях науки. Более 90 процентов научных открытий, крупные изобретения приходились к этому столетию. Именно в этот период человек получил широкую возможность раскрыть тайны атомного ядра (хотя размер самого ядра невидимо мала), получить огромную энергию атома. Человек сумел создать мощные космические ракеты, аппараты которые успешно достигли поверхности других планет солнечной системы, созданию мобильных коммуникационных систем связи с любой точкой Земной поверхности.

Все эти грандиозные результаты показывают величие человеческой способности, его духа и разума. Однако, с большим сожалением можно отметить, что человек ещё очень мало знает о самом себе. Еще он не способен полно знать о секретах многих болезней (онкологические, психических расстройств), много непонятого о парапсихологических эффектах, не очень известен механизмы воздействия магнитного поля на живой организм. Не совсем понятно движение эритроцитов по мелким капиллярам кровеносных сосудов, диаметр которых немного меньше, чем размер самого эритроцита.

Цель жизни человека заключается в расширении сознания, духовное совершенствование, которое дает возможность знать о себе, о своих проблемах. Об этом сказано еще в глубокой древности на стене греческого Храма, где было написано следующее: «Человек познай самого себя, и ты позна-

ещь Бога и Вселенную».

По современным данным человеческий организм состоит из видимого тела (плотной материи) и энергоинформационного тела (тонкой материи), которые являются его сущностью и определяют все связи с внешним миром. Замалчивая о существовании тонкой материи, наука не в силах объяснить так называемые парапсихологические способности человека, да и просто работу мозга и его роль в феномене сознания и мыслительной деятельности. Об этом же было написано еще в известной книге гениального мыслителя Востока, Таджикского классика, поэта Н. Хисрава («Вачхи дин» – «Лицо религии»), где говорится, что человеческое тело состоит из вещественного и духовного начало, раскрывая философию духовной сущности человеческого организма. По Н. Хисраву когда полное страстное желание человека приближается к его полному Разуму, он приблизиться к порогу божественного Храма и тем самым становится великим из величайших.

Какое отношение все эти высказывания имеют к написанной работе? Имеют непосредственное отношение. В работе будут рассматриваться многие вопросы, упомянутые выше. Рассматриваются многие физико-медико-биологические проблемы человеческого организма, ее Святой части – физика крови и некоторые ее компоненты.

Кровь является удивительное творение природы и считается носителем жизни на Земле и недаром протекание ее по кровеносным сосудам называют рекой жизни. В капле крови, как в зеркале отражается состояние нашего организма.

О величающей роли крови в жизни человека были высказаны ещё древнегреческими философами, которые считали кровь носителем души. Древнегреческий врач Гиппократ считал, что в крови здоровых людей – здоровая душа. Согласно многим древним религиям кровь считается вместилищем души. В Библии после слово «Бог» на втором месте идет слово «Кровь».

По современным научным понятиям, кровь – это жидкость

в которой находятся форменные элементы: эритроциты, лейкоциты, тромбоциты, растворы – питательные вещества, аминокислоты, жирные кислоты, жиры, холестерин (строительный материал для гормонов), глюкоза, минералы, витамины, ферменты, гормоны, а также грибы, токсины, органические кислоты, антитела, кислород и углекислый газ.

В организме кровь выполняет самые важнейшие физиологические функции. Как жидкая фаза, она доставляет к тканям и всем клеткам организма кислород и питательные вещества, должна получить все энергии природы. Кровь также активно участвует в регуляции водно-солевого баланса и кислотно-щелочного равновесия в человеческом организме, в поддержании постоянной температуры тела.

Человеческая кровь теснее всего связана с эфирным телом (аура) – та оболочка, в которую заключено тело материальное. Она как и эфирное тело может рассказать о человеке – от состояния его внутренних органов от его прошлого и будущего. Более того, если эфирное тело подвергается негативному воздействию, кровь узнаёт об этом первой. Она прекрасно различает вредную для организма информацию и до определённой степени противится ей.

Всего в человеческом теле содержится 5 литров крови. Она более чем на 90 процентов состоит из воды, а вода является мощным информационным магнитом. Учёные определили, что на воду записывается вся информация с любого носителя, в том числе с человека. При этом записанная информация может удерживаться водой сколько угодно, долго и без каких-либо воздействия не разрушается.

Кроме воды в крови содержится минеральные соли. На каждый 100 миллилитров крови приходится 0,85 граммов хлористого натрия. Повышение и понижение концентрации хлористого натрия в составе крови приводит к разрушению эритроцитов. Хлористый натрий также необходим для выработки соляной кислоты железами желудка.

Из форменных элементов крови большую часть составля-

ют эритроциты. Они занимают около 45 процентов объёма крови. Основной задачей эритроцита совместно с гемоглобином в организме является перенос кислорода. Форменные элементы лейкоциты считаются центральным звеном иммунной защиты человека. Они активно поглощают бактерии и вступают в борьбу с микробами. Одним из видов лейкоцитов являются лимфоциты, и они в первую очередь, считаются организаторами нашей иммунной реакции. Они способны выработать защитные белки — иммуноглобулин, которые разрушают чужеродные белки.

Роль тромбоцитов крови весьма велика при свертывании крови. Это защитная реакция организма, направленная на предотвращение потери крови из повреждённых сосудов.

Более подробно об этих и многих других биофизических проблемах рассматриваются в настоящей работе, причём некоторые из них рассматриваются впервые. Здесь можно отметить определение массы и плотности молекул гемоглобина, являющегося важной проблемой современной биологии и медицины. Также были исследованы вопросы прочности цепочной структуры гемоглобина и воздействие магнитного поля на этих веществ.

В работе также впервые даётся теории распада форменных элементов крови и время их жизни. В последней главе книги приводится биофизика клеточной мембраны и теория переноса веществ через эти мембраны.

ТЕЧЕНИЕ КРОВИ — РЕКА ЖИЗНИ

Кровь является удивительным творением природы и считается носителем жизни на Земле и не даром ее протекание по кровеносным сосудам называют рекой жизни. В капле крови, как в зеркале отражается состояние нашего организма. Она выполняет в организме самые важнейшие физиологические функции. Как жидкая фаза, непрерывно циркулирующая по кровеносным сосудам она доставляет к тканям кислород и питательные вещества, участвует в регуляции водно-солевого обмена и кислотно-щелочного равновесия в организме и поддержания постоянной температуры тела.

Даже после неожиданной смерти человека, на 6-8 часов, кровь его полностью сохраняет свои физиологические качества и его можно переливать больным. Клинический эффект первого в истории медицины переливание крови, полученное от умершего, было весьма хорошим.

За разработку метода переливание крови от умершего С.С. Юдин и В.Н. Шамов в 1962 году были удостоены Ленинской премии. Как непрозрачная вязкая суспензия кровь состоит из жидкообразной плазмы и плавающих в ней клеток трёх видов: красные кровяные клетки (эритроциты), белые кровяные клетки (лейкоциты) и кровяные пластинкообразные клетки (тромбоциты). В одном кубическом миллилитре крови содержится 3,9 — 5 миллионов эритроцитов, 4-9 тысяч лейкоцитов и 180-320 тысяч тромбоцитов.

Всего в организме человека содержится 5 литров крови (5,2 литра у мужчины) и (3,9 литра у женщин). Каждый день это количество крови проходит через сердце более чем 1000 раз.

Кровь более чем на 90 процентов состоит из воды. Вообще организм не может существовать без воды. Она распределена в организме следующим образом: 42 процентов воды прихо-

дится на внутриклеточную жидкость, а остальная часть — на внеклеточную жидкость. В одном грамме белка содержится 3 миллилитра воды. Она считается активным участником во всех биологических процессах. Потери 20-25 процентов воды вызывает гибель организма.

В состав крови кроме воды находится значительное количество минеральных солей. Установлено, что на каждые 100 миллилитров крови приходится 0,85 граммов хлористого натрия. Повышение или понижение концентрации хлористого натрия в составе крови может привести к разрушению эритроцитов и к гибели человека. Хлористый натрий принимает активное участие в регуляции содержания жидкости в крови. За год человек съедает 5 килограммов поваренной соли, которая представляет собой хлористый натрий с небольшими примесями. Плотность крови организма человека равна $1,042 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, плотность плазмы будет $(1,025 \cdot 10^3 \div 1,032 \cdot 10^3) \text{ кг/м}^3$ и плотность эритроцитов составляет $1,09 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Кровь действительно вязкая жидкость, причем вязкость ее определяется содержанием эритроцитов и растворенных белков. От вязкости крови зависит в значительной степени скорость, с которой кровь протекает по кровеносным сосудам. Величина вязкость крови составляет $5 \cdot 10^{-3}$ Пуаз.

1.1. Эритроциты крови

Первооткрывателем форменного элемента крови эритроцита считается известный голландский естествоиспытатель Антони ван Левангук. Эти безъядерные клетки крови содержат внутри себя растворобразный гемоглобин, тот самый красный пигмент крови, который придает крови красный цвет. Большую часть клеток крови составляют эритроциты. Эритроциты занимают около 45 процентов ее объема, а в каждом кубическом миллиметре крови их насчитывается примерно 5 миллионов.

Учитывая это легко можно определить полное число эритроцитов в организме здорового человека:

$$N_э = nV = 5 \cdot 10^6 \frac{5 \cdot 10^{-3}}{10^{-9}} \text{ эрит} = 25 \cdot 10^{12} \text{ эритроцит, (1.1)}$$

где, n -концентрация эритроцитов в крови, V — объем крови человека.

Эритроциты представляют собой очень гибкие эластичные двояковогнутые линзы или диски (рис. 1). Такая лепешечно-образная форма наиболее выгодно для содержания и переноса кислорода по кровеносным сосудам и имеет очень тонкие мембраны — $7,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}$. Поверхность эритроцита благодаря ее форме в 1,6 раз больше чем если бы он имел вид шарика при том же объеме. Увеличение поверхность позволяет ему в большей степени адсорбировать кислород. Несмотря на то, что диаметр эритроцитов 5-8 мкм, они могут проникать в капилляры диаметром до 3мкм.

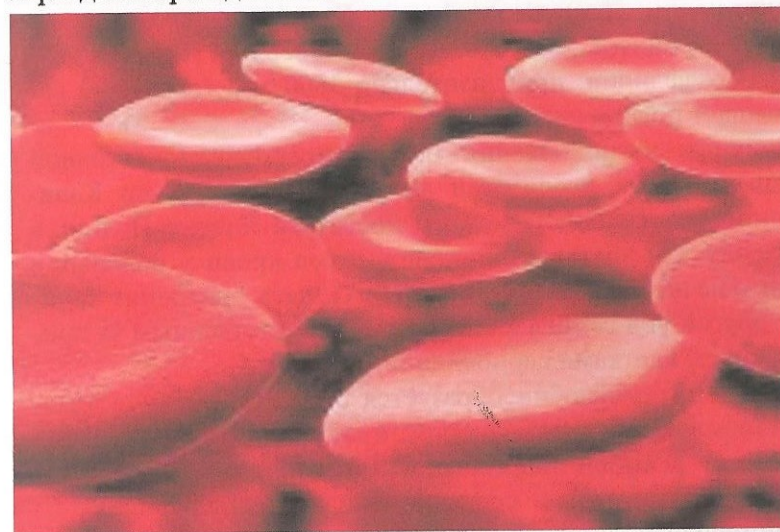


Рис 1. Форма эритроцита

При деформациях площадь эритроцитов при их соприкосновения со стенками капилляров увеличивается, что ведет к увеличению скорости газообмена. Иногда бывает случай, когда эритроциты принимают сферическую форму при болезни сфероцитоза. Мембрана таких эритроцитов при движении по капиллярам растягивается и определенный процент их разрушается. Уменьшение их количество в крови приводит к анемии, обусловленные уменьшением кислорода в крови больного.

Форма и размеры эритроцитов имеют очень важное значение. Их изменения приводят к тяжёлому заболеванию. Примером заболевания, обусловленного нарушением полипептидной цепи, является серповидноклеточная анемия. При таком заболевании эритроциты становятся жесткими, что связано с изменением растворимости гемоглобина в эритроцитах больных. Молекулы гемоглобина соединяются друг с другом, образуют жидкокристаллические структуры, обуславливающие аномальную форму. Благодаря такому строению эритроцитов их суммарная поверхность достигает огромных величин, приблизительно 3800 м^2 , что в 1500 раз превышает поверхность тела человека.

Причину возникновения болезни серповидноклеточной анемии впервые исследовал знаменитый профессор Калифорнийского Технологического института Лайнус Полинг в 1952 году. Он впервые установил, что в крови у больных в место обычного гемоглобина A(HbA), весь эритроцит занимает другой вид гемоглобина, S(HbS), ответственным за приобретение клетками серповидной, формы.

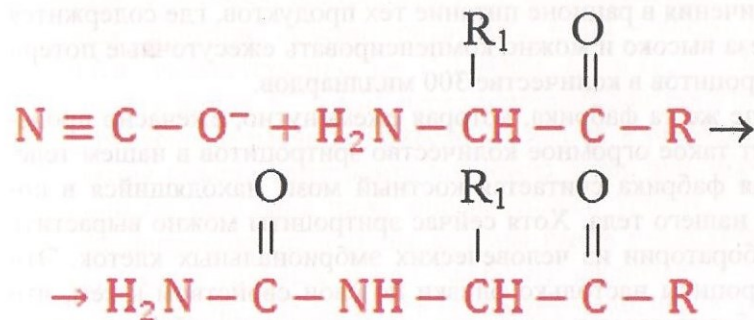
Этот вид гемоглобин образуется с новыми химическими свойствами, он плохо растворим, и легко выпадает в осадок, что влечет за собой повреждение эритроцитов. У этих гемоглобин намного меньше сродство к молекуле кислорода.

Аномальный гемоглобин (HbS) движется в электрическом поле гораздо медленнее, чем гемоглобин (HbA). Благодаря этому их присутствие в электрическом поле можно легко

установить.

Каждая молекула гемоглобина в эритроците состоит из четырёх цепочек аминокислот. Оказалось, что вместо одной из 547 аминокислот, в β - цепях, гидрофильная отрицательно заряженная глутаминовая кислота заменена гидрофобным (нерастворимым в воде) волином. Такое незначительное изменение структуры молекулы гемоглобина эритроцита делает его неполноценным, а эритроциты, содержащие такой гемоглобин, приобретает форму серпа.

Из анализа причин заболевания следует, что для исправления дефекта или болезни необходимо устранить гидрофобную агрегацию молекул гемоглобин S (HbS). Это можно сделать, если к полярному цианату ($\text{N}=\text{C}-\text{O}$) присоединить концевой волин.



Присоединение полярного цианата к концевому волину уменьшает его гидрофобность и тем самым ослабляет гидрофобные взаимодействия на этом участке эритроцита. Обработка эритроцитов крови цианатом приводит к нормализации формы клеток и устранению симптомов заболевания.

Средний диаметр эритроцита составляет 7,2 микрона. Однако, в крови можно заметить и эритроциты-гиганты, имеющие диаметр 9-10 микрон и эритроциты – карлики диаметром 3-4 микрона. Эритроциты – карлики встречаются в крови больных малокровием. Эритроциты – гиганты появляются в

крови людей при недостатке витамина В₁₂. Увеличение количества эритроцитов в крови отмечается при заболеваниях, для которых характерно повышение концентрации гемоглобина. Уменьшение эритроцитов от нормы (у мужчин $4 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^6$ в одном микролитре), у женщин ($3,7 \cdot 10^6 - 4,7 \cdot 10^6$ микролитре) наблюдается при понижении функции костного мозга, вследствие усиленного распада эритроцитов, при дефиците в организме железа. При этом перенос кислорода нарушается и наступает кислородное голодание клеток организма. У больного наступает состояние малокровие.

Недостаток кислорода организм пытается компенсировать путем увеличения количества эритроцитов и содержания гемоглобина в них. Для этого необходима усиленная работа костного мозга. Ведь каждые две недели состав крови в теле должны обновляться. Именно, только таким путем и путем увеличения в рационе питания тех продуктов, где содержится железа высоко и можно компенсировать ежедневные потери эритроцитов в количестве 300 миллиардов.

Где же та фабрика, которая ежеминутно, ежечасно производит такое огромное количество эритроцитов в нашем теле. Такая фабрика считается костный мозг, находящийся в костях нашего тела. Хотя сейчас эритроциты можно вырастить в лаборатории из человеческих эмбриональных клеток. Эти эритроциты настолько близки по своим свойствам к тем, что вырабатываются в организме, что вполне способны заменить их при переливаниях крови. (Работ Линза из Чикаго, США).

1.2. О регуляции объема эритроцита

Любая клетка состоит из множества молекул, которых нет в окружающей среде, а эти молекулы создают внутри клетки избыточное осмотическое давление, то клетка должна противостоять осмосу и контролировать свой объем. Для этого существуют специальные насосы или каналы переноса, которые дают клетке фантастическую устойчивость и автономность.

Для этого были предложены системы регуляции объема клетки (эритроцита).

В этом плане можно отметить работы Е. Якобсона и Ф. И. Атауллаханова рассматривающую гомеостаз ионов K^+ и Na^+ в эритроцитах крови и его связь с объемом клетки. Они получили формулу, связывающую объема эритроцита от баланса активных и пассивных потоков катионов натрия Na^+ и калия K^+ через мембрану. Формула имеет вид:

$$\frac{dV}{dt} \frac{V}{V^0} = \frac{1}{L} (I_K + I_{Na} - (\eta - \mu)) v_{Na,K-ATPase},$$

где, $v_{Na,K-ATPase} = \alpha Na^+ ATP$, $\alpha = 4,5 \cdot 10^{-2} \frac{mM}{r}$, $ATP = 1,43 mM$, V — объем эритроцита, V^0 — физиологические, нормальное значение объема эритроцита, η и μ — число ионов K^+ и Na^+ соответственно, $L = 150 M Osm$, I_K и I_{Na^+} — пассивные потоки ионов K^+ и Na^+ через мембрану эритроцита.

Приведенные расчеты привело Якобсона к выводам, что регуляция объема эритроцита возможна лишь при значении потенциала мембрана ниже определенного уровня, а внутренние непроницающие ионы должны иметь отрицательный заряд. Самый главный вывод Якобсона заключается в том, что соотношение пассивного и активного транспорта является определяющим для объема эритроцита и потенциала на ее мембране. Если объем эритроцита увеличивается более чем в 1,5 раза, эритроцит лопнет. Это максимальный объем, который может быть заключен в практически нерастяжимую клеточную мембрану, имеющую площадь поверхности нормального эритроцита.

1.3. Лейкоциты

Открытие белых кровяных телец или Лейкоцитов тесно связано с именем выдающегося английского анатома Вильяма Гевсона, совершившего 200 лет тому назад. Лейкоциты —

белые кровяные клетки; неоднородная группа различных по внешнему виду и функциям клеток крови человека или животных, выделенная по признаку отсутствия самостоятельной окраски и наличия ядра.

Эта бесцветная живая клетка крови считается как круглыми шариками с размерами значительно больше чем размеры эритроцитов. Они содержат ядро и могут двигаться со скоростью $7 \cdot 10^{-7}$ м/с. Лейкоциты движутся по одиночке, в непосредственном близости к стенкам кровеносных сосудов.

Лейкоциты бывают разных типов (лимфоциты, моноциты, базофилы, эозинофилы и нейтрофилы). В организмы они поглощают бактерии, вырабатывают антитела и вступают в борьбу с микробами. Среднее количество лейкоцитов по данным В.И. Пупкова колеблется от 4 до 9 тысяч в одном микролитре крови. Их общее количество в 5 литрах крови человека составляет 30 миллиардов.

При пневмонии лейкоциты в крови часто достигает до 300 миллиардов. На рис 2 клеточные элементы крови (изображение получено с помощью сканирующего электронного микроскопа). Видны двояковогнутые эритроциты и сферические лейкоциты с шероховатой поверхностью.

Уменьшение числа лейкоцитов в крови приводит лучевое поражение организма, контакт к рядом химических веществ (бензол, мышьяк и др.), прием лекарственных препаратов.

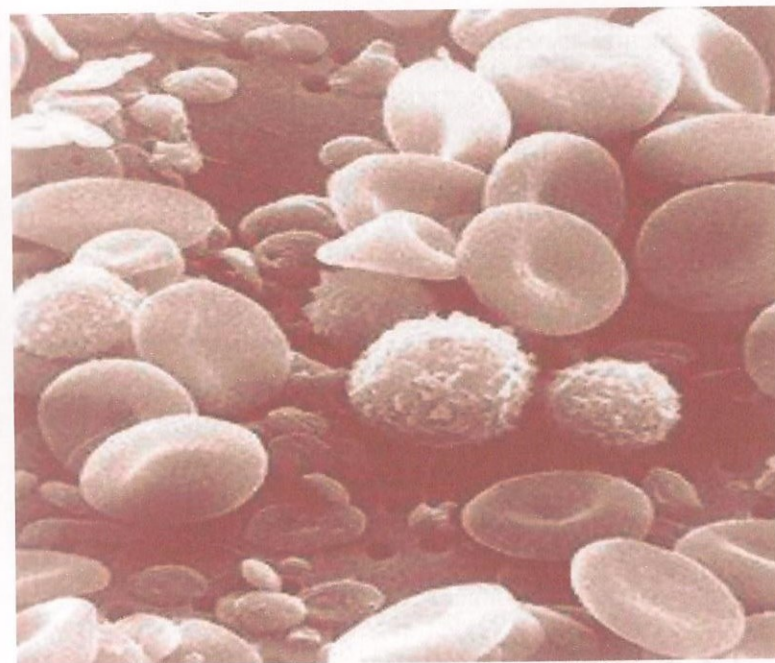


Рис. 2. Клеточные элементы крови

По последним данным лейкоциты распределяются в следующих соотношениях: базофилы – 0,1%, эозинофилы – 0,5-5%, палочка ядерные нейтрофилы – 19-37%, моноциты – 3-11%. Увеличение числа лейкоцитов может быть физиологическим и патологическим путем некоторых острых и хронических инфекциях, воспалительных заболеваниях, интоксикациях, тяжелом кислородном голодании и у лиц со злокачественными образованиями и болезнями крови.

Из числа Лейкоцитов необходимо выделить лимфоциты, которые составляют 19-37 процентов. Они представляют собой круглые маленькие клетки, размером всего 7-9 микрон. Основную часть клетки занимают ядро, покрытие тонкой оболочкой цитоплазмой. Именно лимфоциты являются организаторами нашей иммунной реакцией, т.е. считаются цен-

тральными звеном иммунной защита человеческого организма.

В некоторых случаях количество лейкоцитов в крови больных снижается в 2-3 раза, что представляет большую опасность для организма. Такое состояние называется лейкопенией. При тяжелой лейкопении организм не в состоянии бороться с различными заболеваниями. Лейкопения возникает при вирусных и при тяжело протекающих бактериальных инфекционных, заболевания системы крови.

Большой вклад в изучении болезни крови внес великий русский учёный, профессор Александр Крюков в начале 20 века. Он экспериментально доказал, что причинной увеличения лейкоцитов в крови является усиленная деятельность костного мозга на какое-либо воздействие. Из этого сделан важный вывод: при лейкопролии, прежде всего, поражается костный мозг — ведь при этой болезни число лейкоцитов в крови значительно увеличивается.

1.4. Тромбоциты и свертывание крови

Эти форменные элементы были впервые установлены французским ученым А. Даниелем в 1842 году. Он сделал заявление, что в крови содержатся не два вида форменных элементов (Эритроциты, Лейкоциты), а три. К третьему виду Даниель отнес мельчайшие образования, которые с трудом можно было рассмотреть в микроскопе. Он их в начале назвал кровяными пластинками (по современному представлению жидкие кристаллы), а потом их именовали тромбоцитами.

Тромбоциты — мелкие плоские бесцветные тельца двояковогнутой формы в большом количестве циркулирующие в крови; это постклеточные структуры, представляющие собой окруженные мембраной и лишенные ядра фрагменты цитоплазмы гигантских клеток костного мозга — мегакариоцитов.

Сейчас установлено, что у здорового человека в крови

примерно 1,5 триллиона тромбоцитов. Имеют место суточные колебания: днем тромбоцитов больше, чем ночью. Увеличение содержания тромбоцитов в периферической крови называется тромбоцитозом, уменьшение — тромбоцитопенией.

Главной функцией тромбоцитов является участие в гемостазе. Тромбоциты способны прилипать к чужеродной поверхности (адгезия), а также склеиваться между собой (агрегация) под влиянием разнообразных причин. Тромбоциты продуцируют и выделяют ряд биологически активных веществ: серотонин, адреналин, норадреналин, а также вещества, получившие название пластинчатых факторов свертывания крови. Они имеют размеры (1,5-2,5) микрона и обладают ядром и активно участвуют в процессе свертывания крови. Свертывание крови, называется процесс превращения жидких кристаллов в эластичный сгусток (тромб).

Свертывание крови на месте ранения жизненно принципиальная реакция, обеспечивает остановку кровотечения на поврежденном участке — сгусток крови. Одно из важнейших параметров фибрина и его способность полимеризоваться с образованием длинных волокон, которые сжимаются и выталкивают из сгустка сыворотку крови. Если бы кровь не свертывалась, то даже после мелкого ранения кровотечения продолжалась бы до тех пор, пока человек не истечет кровью полностью. В действительности ранка быстро прекращает кровоточить в результате образования сгустка — тромба.

Основу кровяного сгустка составляет белок фибрин, образующий тонкие нити. В обычных условиях он находится в крови в виде фибриногена, молекулы которого имеют гантелеобразные формы.

От чего кровь свертывается? Ответ на этот вопрос дал более 100 лет тому назад А.Шмидт (Тарту в Эстонии). Он сделал следующий вывод: нити фибрина в крови образуются не сами по себе, для этого необходимы активации тромбина. Для свертывания крови вначале в нем появляется тромбин.

Он действует на растворенный в крови фибриноген (предшественник фибрина). Фибриноген превращается в фибрин, а фибрин образует сгусток – тромбин. Тромбин, в свою очередь образуется в крови в результате распада лейкоцитов. Различают 5 форм тромбоцитов: юные (0 – 0,8 %), зрелые (90,3 – 95,1 %), старые (2,2 – 5,6 %), формы раздражения (0,8 – 2,3%) и дегенеративные формы (0 – 0,2%) (Copyright © MedicInform.Net).

1.5. Плазма крови

Известно, что кровь по мимо форменных элементов состоит из жидкой части плазмы, имеющий соломенно-желтого цвета. Роль плазмы крови в организме столь же велика как и эритроциты. Именно через плазмы крови осуществляется питание клеток организма.

После переваривание и расщепления пищи в кишечнике, белки, жиры, углеводы и минеральные соли высасывается через стенки кишок, попадают в плазму крови и затем разносятся по всему организму. В плазме также поступают гормоны – особые химические вещества, которые вырабатываются железами внутренних секреции. Гормоны в организме регулируют деятельность многих органов и систем организма. А доставляются в эти органы с помощью плазмы.

В плазме крови растворены минеральные соли, играющие важную роль в поддержании солевого равновесия. Плазма совместно с тканевой жидкостью обеспечивает необходимые условия для химических процессов, происходящих в клетках. Тонкий химический анализ может установить присутствие в плазменной крови аминокислот, которые представляют собой мельчайшие белковые частицы, образовавшиеся в результате расщепления белков.

Учение установили или посчитали, что в плазмы крови находятся более 200 различных веществ. К числу более принципиальных катионов относится натрия (Na^+), кальций (Ca^{2+}) и магния (Mg^{2+}). К числу важнейших анионов относятся хлор (Cl^-), бикарбонат (HCO_3^-) и фосфат (H_2PO_4^-). Их численное

значение дается в таблице 1. Альбумин нужен для поддержания осмотического равновесия в крови. Особые значения для жизнедеятельность организма имеют белки плазмы. А Тизелнус (1937 Швеция) доказал, что плазма крови состоит из различных белков.

Таблица 1

Содержание различных веществ в плазме крови

№ п.п.	Название веществ	Содержание в миллиграммах на 100 миллилитрах
1.	Натрий	310 – 340
2.	Калий	14 – 20
3.	Кальций	9 – 11
4.	Фосфор	3 – 4,5
5.	Хлор	350 – 375
6.	Глюкоза	60 – 100
7.	Мочевина	10 – 20
8.	Холестерин	150 – 280
9.	Белки	6000 – 8000
10.	Альбумин	3500 – 4500

Он также обнаружил в плазме две основные фракции белка: альбумины и глобулины. Тизелус также установил, что гаммаглобулин содержит внутри себя вещество, защищающее нас от инфекционных болезней. Плазма крови состоит из 93 – 96 процентов воды. В плазме крови, кроме всего, присутствует несколько углеводов, из которых наиболее важное значение имеет глюкоза. Уровень глюкозы в плазме постоянный и регулируется специальными механизмами. Поджелудочная железа вырабатывает особый гормон – инсулин, при недостатке которого может развиваться диабет (сахарная болезнь).

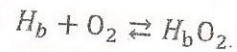
В плазме можно найти фосфор, йод, магний. Если количество йода в плазме сокращается в несколько раз, наступает одно из заболеваний щитовидной железы – эндемическом зобе. Снижение содержания магния в крови наблюдается при эпилепсии.

ГЕМОГЛОБИН КРОВИ

Гемоглобин наиболее совершенное творение природы. Он как красный дыхательный пигмент крови состоит из белка глобина (96%) и железопорфирина – гемма (4%).

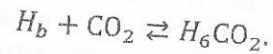
Основная задача гемоглобина это транспортировка кислорода от органов дыхания к тканям и углекислый газ от тканей к дыхательным органам.

Реакция соединения гемоглобина с кислородом протекает довольно быстро, она измеряется долями секунды. Химики пишут ее таким образом:



где H_b выражает гемоглобин.

При прохождении крови по легочным капиллярам гемоглобин соединяясь превращается в оксигемоглобин. После этого в тканях организма кислород отщепляется от оксигемоглобина и используется клетками. Освободившийся при этом гемоглобин присоединяет к себе накопившуюся в тканях углекислоту, в результате чего возникает другое соединение гемоглобина – карбоксигемоглобин:



Затем все это периодически повторяется. Кровь снова попадает в легкие, карбоксигемоглобин отщепляет углекислоту, которая выделяется в воздух, а гемоглобин опять соединяется с кислородом.

Если этот периодический процесс остановится, клетки организма через несколько минут могут погибнуть. Наиболее чувствительны к снабжению кислородом являются клетки головного мозга. При недостатке кислорода они первыми выходят из строя.

Более обстоятельно этот вопрос с биохимическим подходом рассматривается в гемоглиновой буферной системы. Эта основная и наиболее мощная эритроцитарная система крови, которая дается в следующем параграфе.

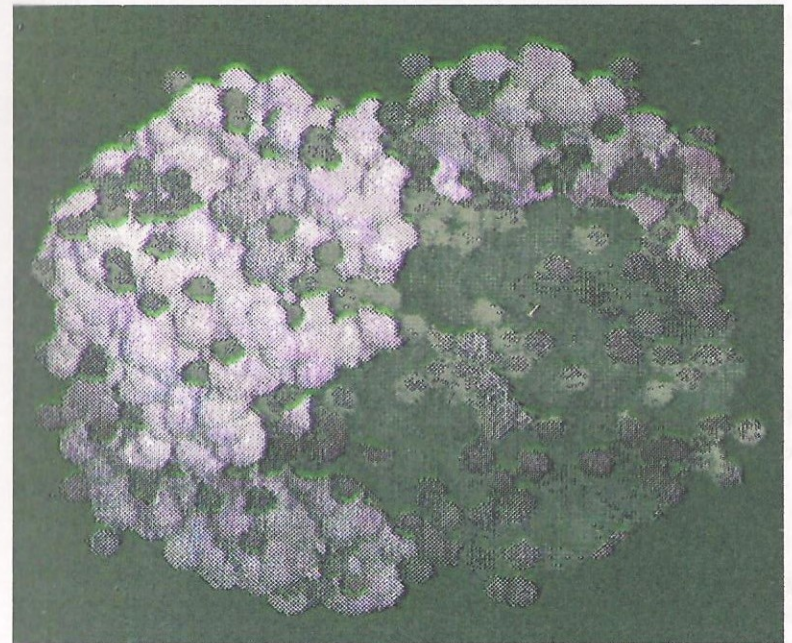


Рис. 3. Молекула гемоглобина; 4 цепи гемоглобина окрашены в разные цвета

Выдающуюся роль в открытии строения молекулы гемоглобина сыграли исследования М.Прутца, знаменитого английского профессора физиолога. Оказалось, что каждая молекула гемоглобина состоит из четырех длинных цепочек аминокислот. Две из них он обозначил α – цепи, содержащие по 141 звену, а две другие назвал β – цепями, содержащие 146 звеньев (рис. 3). Такие цепочки вытянутые в пространстве были бы очень длинные. Поэтому по природе они при-

обрекли очень удобное приспособление. Они закручены вокруг своей оси и существуют в виде спирали. Контурная длина спирали определяется по формуле.

$$L = \frac{R_N^2}{l}, \quad (2.1)$$

где R_N — размер глобулообразного клубка гемоглобина, l — размер молекулы гемоглобина.

М. Прутцу удалось измерить и размер глобулообразной молекулы гемоглобина. Высота молекулы оказалась $(45-50) \cdot 10^{-10}$ м а ширина $(55-65) \cdot 10^{-10}$ м. За открытие строения молекулы гемоглобина М. Прутц был удостоен Нобелевской премии.

Каков же размер клубка в которой двойная спираль молекулы гемоглобина сформировала бы при случайных «броуновских» изгибах? В этом случае размер клубка определяется следующим образом

$$R_N = N^{1/2} l \quad (2.2)$$

где N — число звеньев в цепи. В частности, для α — цепи $N=141$, а $l=6 \cdot 10^{-9}$ м. Подставляя эти данные в (2.2), находим $R_N=7,2 \cdot 10^{-8}$ м. Естественно, согласно (2.1), длина контура будет $L=8,7 \cdot 10^{-7}$ м.

Интересно было бы знать вязкость гемоглобина. Ее определим из выражения

$$\eta = \frac{(mkT)^{1/2}}{3\pi r l}, \quad (2.3)$$

где m — масса молекулы гемоглобина, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, $r=3 \cdot 10^{-9}$ м. Подставляя в (2.3) $m=2,3 \cdot 10^{-23}$ кг, $k=1,4 \cdot 10^{-23}$ Дж/К⁰, $T=300$ К, и $l=6 \cdot 10^{-9}$ м, находим $\eta=6 \cdot 10^{-3}$ П.

2.1. Гемоглобинная буферная система

Буферная система гемоглобина считается основной и наиболее мощной эритроцитарной системой крови. Она состоит из гидрогемоглобина ННб и калиевой соли гемоглобина КНб. Действие гемоглобиновой и бикарбонатной буферной системы строго взаимосвязано. Именно такое тесное взаимодействие в кровеносных сосудах обеспечивает состояние щелочных резервов крови. В легких гемоглобин выводит из бикарбонатов угольную кислоту и понижает щелочные резервы в крови.

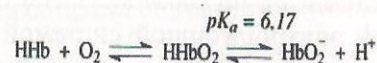
Степень диссоциации кислотных групп кислорода в зависимости от степени насыщения кислорода меняется. Окисление гемоглобина приводит к смещению PK_a ряда кислотных групп гемоглобина с 7,71 до 6,17, т. е. оксигемоглобин считается более сильной кислотной, чем не оксигемоглобин.

Таким образом, присоединение кислорода способствует диссоциации кислотных групп в гемоглобине:



Углекислый газ, образующийся в процессе обмена, поступает из тканей в крови. Его высокое парциальное давление в крови способствует его проникновению в эритроците, где CO_2 под влиянием карбоангидразы гидратируется с образованием H_2CO_3 . Освободившиеся протон H^+ при диссоциации H_2CO_3 присоединяется к иону $НбO_2^-$, входящему в состав КНбО₂. Редуцированный ННб теряет сродство к O_2 и отдает его плазме крови, а потом в ткани. Заряд высвободившихся ионов K^+ компенсируется зарядами анионов $H_2CO_3^-$ и Cl^- присутствующие в эритроците. Избыток анионов $H_2CO_3^-$, выводится из эритроцита в плазму крови, где взаимодействует с ионами Na^+ , заменяя при этом Cl^- на $NaCl$. Противоположений происходит в капиллярах легких. В альвеолах парциальное давление O_2 , высшее, чем парциальное давление CO_2 . Кислород поступает в кровь а затем в эритроците, где взаи-

моделирует с гемоглобином. Кислотные группы белковой части



Физиологическое значение этих реакций очень велико.

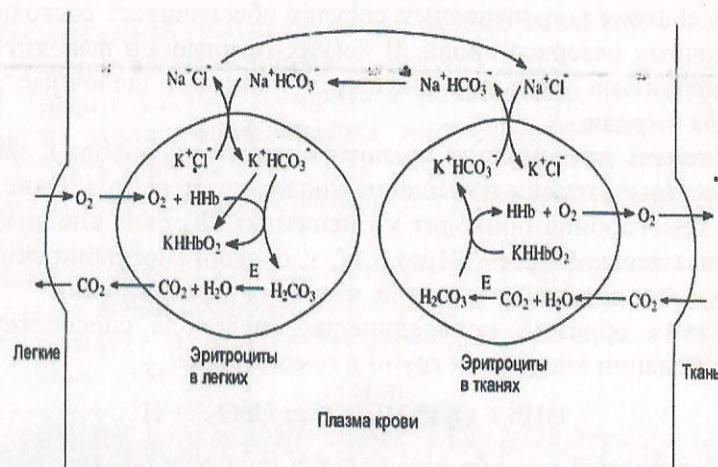
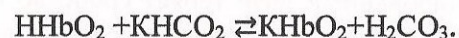


Рис. 4 Схема участия гемоглобина эритроцитов в транспорте O_2 и CO_2

оксигемоглобина диссоциирует с образованием протонов H^+ и иона HbO_2^- , который выводит анион из K HCO_3^- :



Углекислый газ, образуется при распаде угольной кислоты, выводится в плазму крови, а потом в легкие. Уменьшение анионов в эритроцитах компенсируется за счет поступления их из плазмы, путем замещения их на анионы Cl^- .

Таким образом, существует тесная взаимосвязь между снабжением тканей кислородом и выведением из них угле-

кислого газа CO_2 , благодаря участию гемоглобина в обеих процессах. Схема участия гемоглобина эритроцитов в переносе O_2 и CO_2 дается на рис. 4.

2.2. Определение массы и плотности гемоглобина крови

Масса и плотность молекулы гемоглобина являющиеся важными медикобиологическими параметрами были установлены нами. Для определения массы молекулы необходимо было знать молекулярную массу гемоглобина. Она определяется по формуле

$$M_{\text{гм}} = M_{\text{г}} + M_{\text{гб}} = M_{\text{г}} + 24M_{\text{г}} = 25M_{\text{г}} \quad (2.4)$$

где $M_{\text{г}}$ – молекулярная масса гемма, $M_{\text{гб}}$ – молекулярная масса глобина. Так как глобин составляет 96 процентов гемоглобина, тогда молекулярная масса глобина $M_{\text{гб}}$ будет больше чем молекулярная масса гемма $M_{\text{г}}$ в 24 раз.

Молекулярная масса гемма в первом приближении можно найти из структурной химической формулы, проведенная в работе М.Б. Волькенштейна. Таким образом, мы нашли $M_{\text{гм}} = 0,54 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$. Массу одной молекулы гемоглобина находим из выражения

$$m_0 = \frac{M_{\text{гм}}}{N_A} = 25 \frac{M_{\text{гм}}}{N_A}, \quad (2.5)$$

где, N_A – число Авогадро. Подставляя значение $M_{\text{гм}}$ и N_A в (2.5), находим

$$m_0 = 2,3 \cdot 10^{-23} \text{ кг.}$$

Общая масса гемоглобина в крови здорового человека согласно работы К.Ю. Богданова определяется следующим об-

разом. В работе приводится, что в 100 миллилитрах крови в среднем содержится 15 граммов гемоглобина, а в 5 литрах она будет $m = 0,75$ кг.

Если известна общая масса и масса одной молекулы гемоглобина можно определить полное число молекул гемоглобина в крови здорового взрослого человека.

$$N_{\Gamma} = \frac{m}{m_0} = \frac{mN_A}{25M_{\Gamma}} \quad (2.6)$$

Подставляя численное значение в формуле (2.6) находим полное число молекулы гемоглобина в нашем организме $N_{\Gamma} = 3,3 \cdot 10^{22}$ молекул.

Из отношения полного числа молекул гемоглобина и полного числа эритроцитов определили число молекул гемоглобина в одном эритроците

$$\frac{N_z}{N_3} = \frac{mN_A}{25M_zN_3} = \frac{mN_A}{25M_z \cdot nV} \quad (2.7)$$

После подстановки числового значения параметров в (2.7), получим значение $1,3 \cdot 10^9$, т.е. в одном эритроците крови содержится более чем одного миллиарда гемоглобина. Это число значительно больше, чем приводится в работе В.И. Пупковой, опубликованной в интернете.

Индивидуальная плотность молекулы гемоглобина находится из соотношения

$$\rho_z = \frac{4 \cdot m_0}{\pi d^2 l}, \quad (2.8)$$

где $d = 6 \cdot 10^{-9}$ м, $l = 4,5 \cdot 10^{-9}$ м согласно работы М. Прутца. После подстановки числовые значения в формуле (2.8), находили $\rho_z = 1,6 \cdot 10^2$ кг/м³. Это значение хорошо совпадает с плотностью растворенного вещества, что упоминается в дру-

гих работах.

Поскольку главным поставщиком или носителям молекулы кислорода в организме считается гемоглобин, необходимо знать кислородную ёмкость крови. Из литературных данных известно, что максимальная ёмкость крови составляет 0,2 литра кислорода в одном литре крови. Естественно, в 5 литрах крови она соответственно составляет один литр кислорода.

Зависимость между массой человека и потреблением им кислорода за единицу времени были установлены нами в виде формулы следующим образом:

$$q = \frac{V \cdot v}{m} = \frac{V \cdot v_0}{m} \left(\frac{m_0}{m} \right)^n, \quad (2.9)$$

где V – объем или ёмкость кислорода в организме, m – масса тела человека, $m_0 = 7 \cdot 10^{-3}$ кг, $v_0 = 8 \cdot 10^2$ л/мин, $n = 0,25$ – постоянные величины.

Связь между частотой v сердечных сокращений при дыхательных процессах от массы тела различных животных получена нами на основе графических данных, проведенных в книге А.С. Белановского. Частота сердечных сокращений больше, чем меньше масса животного, так как чем меньше масса, тем больше отношение поверхности к объему тела и тем больше теплопотер в окружающую среду, следовательно тем больше объем веществ и снабжение организма кислородом. Теперь, подставляя все значения в уравнение (2.9), находим

$$q = 19 \frac{\text{мм}^3 \text{O}_2}{\text{г} \cdot \text{с}}$$

Это значительно больше чем, приводится в книге К.Ю. Багданова. Чем выше содержание гемоглобина в крови человека, тем больше ее кислородная ёмкость т.е. тем больше кислорода в единице объема она может перенести за единицу времени.

2.3. Последствия железодефицита в гемоглобине крови

Являясь одним из компонентов крови, железо принимает активное участие в транспортировке молекул кислорода из легких по всем тканям и системам человеческого организма. За поставку кислорода к каждой живой клетке отвечает железосодержащий белок – гемоглобин.

При нехватке железа в организме формируется малая часть гемоглобина что способствует образованию железодефицитной анемии или просто малокровия.

Человек должен время от времени употреблять необходимое количество железа. Чтобы железо осуществляло свою задачу в гемоглобине, оно должно образовать связь с ним. В организме должен регулярно осуществляться синтез гемоглобина, который зависит от поддержания необходимого количества ферментов и витаминов, в особенности витамина В₆. При нехватке витамина В₆, железу сложно с чем – либо соединиться. В итоге формируется недостаток гемоглобина. Нехватка железа в гемоглобине может привести к весьма неприятным последствиям, поскольку любой дефицит железа в организме способствует ухудшению поступления кислорода в клетки. Из-за этого возрастает опасность вирусных заболеваний, ухудшает иммунитет, замедляется процесс роста и умственное развитие у детей. Также увеличивается усталость, усиливается частота биения сердца.

Как восполнить дефицит железа в организме? Для этого рекомендуется включить в рацион те продукты содержание железа, в которых высоко. Сюда входят такие продукты как красное мясо, мясо цыпленка, свинина, семена тыквы, соя, малина, гранат, черешня, клубника, черная смородина.

2.4. О прочности структуры биополимера гемоглобина крови

Гемоглобин как жидкокристаллический биополимер и дыхательный пигмент играют немалую роль в нашей жизни. Как носитель кислорода по всему телу, необходимо знать о прочности структуры гемоглобина крови. В этом плане, в первую очередь нужно рассмотреть упругие свойства раствора полимера гемоглобина, т.е. какова модель упругости этого материала.

Известно, что согласно закону Гука, растягивающее напряжение, которое может повлиять на состояние объекта прямо пропорционально модулю упругости или модулю Юнга

$$\sigma = \frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l} \quad (2.10)$$

где, E-модуль упругости, Δl – величина разности деформации, l – первоначальное значение длины цепи полимера гемоглобина.

Сила действующая на единицу площади поперечного сечения σ согласно работы А. Ю. Гросберга и А.Р. Хохлова можно записать в виде

$$\sigma = kTv(\lambda - \lambda^{-2}) \quad (2.11)$$

где k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, v – число субцепей биополимера, λ – величина растяжения биополимера.

При малых значениях растяжений т.е. при λ вблизи единицы значение $(\lambda - \lambda^{-2})$ можно выразить в виде

$$\lambda - \lambda^{-2} = (\lambda - 1) + (1 - \lambda^{-1})(1 + \lambda^{-1}) \approx \lambda - 1 + \frac{2(\lambda - 1)}{\lambda} \approx 3(\lambda - 1). \quad (2.12)$$

Но величина $(\lambda - 1)$, есть относительное удлинение $\frac{\Delta l}{l}$.

Учитывая это обозначение в (2.12) из выражения (2.10) и (2.11) можно определить модуль Юнга

$$E = 3\nu kT = nkT, \quad (2.13)$$

где $3\nu = n$ — концентрация раствора гемоглобина.

По приведенным нами расчетам, общее число молекул гемоглобина в одном эритроците $N = 1,3 \cdot 10^9$, а объем одного эритроцита $V = 3 \cdot 10^{-16} \text{ м}^3$. Следовательно концентрация гемоглобина будет $n = 4,7 \cdot 10^{24}$ молекул в одном кубическом метре.

Теперь подставим в (2.13) $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ и $T = 300 \text{ К}$ $n = 4,7 \cdot 10^{24} \frac{\text{гем}}{\text{м}^3}$, находим значение модуль упругости $E = 2 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$. Это значение точно совпадает со значением осмотического давления молекулой гемоглобина в эритроците. Такое равновесие по-видимому достаточно устойчиво сохраняет прочность цепочной структуры биополимера гемоглобина.

Однако прочность и устойчивость гемоглобине еще зависит от прочности мембраны эритроцита, обладающую значительной прочностью, выдерживающая согласно работы А.Б. Рубина, давление порядка $8 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Хотя мембраны эритроцитов при определенных физико-химического воздействиях могут разрушаться. Они разрушаются под действием механических, тепловых и иных факторов.

В частности можно отметить ультразвуковой механизм разрушения эритроцитов разработанный В. Б. Акопяном, при интенсивности порядка $10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$. Ультразвуковая резистентность (мерой прочности мембрана) эритроцитов оказалось зависящей от массы тела в соответствии с эмпирической формулой

$$R = A \cdot m^\alpha, \quad (2.14)$$

где $A = 24$, $\alpha = 0,66$ — постоянные величины.

Заметно отличаются по прочности эритроциты особей мужского и женского пола. У женского пола прочность эритроцитарных мембран в 1,2 раз меньше, чем у особей мужского пола. Биологический смысл этого явления еще не получил объяснение.

2.5. Воздействие магнитного поля на молекулы гемоглобина крови

Одна из наиболее главных особенностей любого живого организма состоит в его способности быстро от реагировать на изменения происходящие в окружающей среде. Это обусловлено, тем что живые клетки имеют разнообразные рецепторы, обладающими жидкокристаллическими свойствами. Они очень чувствительны к физическим полям, к свету, изменениям температуры и давления в окружающей среде.

Можно привести множество примеров из жизни животных, где разные виды, непосредственно используют магнитные поля в своих навигациях. В частности, лесные мыши, почтовые голуби, пчелы, китообразные и железобактерии прекрасно ориентируются по направлению магнитного поля. Оказывается, для этого они имеют по природе специальные магнитные рецепторы, которые прекрасно направляют их по верному пути.

Однако в силу увеличения солнечной активности магнитное поле Земли сильно изменяется. Образование вспышки на Солнце приводит к росту концентрации электрических ионов в атмосфере, что в свою очередь приводит к увеличению компонентов магнитного поля. Это явления называется «Магнитной бурей». Во время магнитных бурь навигационная способность почтовых голубей существенно ухудшается. Голубь полностью теряет способность ориентироваться, если

на пути голубя амплитуда магнитного поля составляет $5 \cdot 10^{-6}$ Тл.

Еще большей чувствительностью к магнитному полю обладают пчелы. Пчеловоды хорошо знают, что дикие пчелы ориентируют соты точно также (относительно «север-юг»), как они, были ориентированы в родительском улье. Если же новый улье поместить в сильном магнитном поле то ориентация сот нарушается.

Действительно, крошечные магнетиты были обнаружены у морских моллюсков, у железобактерий. С помощью магнитометра были измерены магнетиты у пчел и голубей. Помимо все эти магнитные поля могут повлиять и на молекулы гемоглобина крови млекопитающих, где содержится более 80 процентов железа организма. Он как функциональный белок эритроцитов служащий для переноса молекулярного кислорода от легких ко всем органам и участвующей в обратном транспорте углекислоты.

Воздействие магнитного поля на молекул гемоглобина существенно связано с патологическим эффектом организма. Было уже отмечено, что магнитное поле Земли претерпевает сильное изменение с увеличением солнечной активности, когда происходит вспышка на Солнце. Хорошо известно, что с ростом солнечной активности число инфарктов миокарда увеличивается. Медицинская статистика показывает, что в день появления солнечной вспышки в 1,5 – 2 раза увеличивается число заболевания (инфаркт миокарда, инсульт и т.п.) сердечно-сосудистой системы. Рентгеновское излучение от солнечной вспышке, поглощаясь в ионосферы Земли приводит к резкому усилению электромагнитного поля на частоте ниже 0,1 Гц. При этом, время реакция организма человека увеличивается. Это объясняет в частности связь вспышек Солнца с числом транспортных аварий.

Как это все можно объяснить с точки зрения биофизики? Хорошо известно, что заболевания сердечно – сосудистой системы, самые распространенные в мире и связаны с содер-

жанием эфиров холестерина в крови и геомагнитной пульсации при солнечной активности. Здесь также важную роль играет гемоглобин крови, который очень чувствительно к магнитным полям из-за наличия в нем железа.

С ростом эфиров холестерина в крови увеличивается его магниточувствительная способность. Анизотропия диамагнитной восприимчивости молекул эфиров холестерина крови и насыщенных карбоновых кислот найдена по полученной нами формуле (таблица 2).

$$\Delta X_M = (n + a) \Delta X_{M,CO_2} \quad (2.15)$$

где n – номер гомологического ряда эфира холестерина, определяемой по формуле

$$C_{n+27} H_{2n+44} O_2, \quad (2.16)$$

$a=30,53$ – постоянная величина, $\Delta X_{M,CO_2}$ – молярная анизотропия диамагнитной восприимчивости гомологического звена CH_2 .

Из полученной формулы (2.15) и данные проведенные в таблице 2, согласно работы Ф. Горского следует, что анизотропия диамагнитной восприимчивости эфиров холестерина крови линейно увеличивается с ростом номера гомологического ряда и делает их более чувствительными к воздействию магнитного поля.

Шаг спирали для номеров гомологического ряда в пределах от 2 до 19 можно представить в виде

$$P = P_0 \frac{n_0}{n}^\alpha, \quad (2.17)$$

где $P_0 = 3,2 \cdot 10^{-7} M$, $n_0 = 2,5$ и $\alpha = 0,99 \pm 0,12$ постоянные величины, найдены способом наименьших квадратов.

Таблица 2

ЭФИР ХОЛЕСТЕРИНА

№ n\п	Вещество	Химическая формула	n	M	$\Delta X_{\parallel} \cdot 10^6$	$\Delta X_{\perp} \cdot 10^6$
1.	Формиат	$C_{22}H_{45}COOH$	1	414,0		94,6
2.	Ацетат	$C_{28}H_{47}COOH$	2	428,4	-98,5	
3.	Проционат	$C_{29}H_{49}COOH$	3	442,0		-100,6
4.	Бутират	$C_{30}H_{51}COOH$	4	456,0		-103,7
5.	Капронат	$C_{32}H_{55}COOH$	6	484,4	-109,0	
6.	Капринат	$C_{36}H_{63}COOH$	10	540,5	-124,3	
7.	Лаурит	$C_{38}H_{67}COOH$	12	544,0		-112,6
8.	Мирилат	$C_{40}H_{71}COOH$	14	596,6	-130,0	
9.	Пальмитат	$C_{42}H_{74}COOH$	16	623,0		-118,6
10.	Стеарат	$C_{44}H_{79}COOH$	18	652,6	-141,0	

Из выражения (2.17) вытекает, что увеличение эфира холестерина крови приводит к росту ее спиралообразующей способности, которая в свою очередь приводит к патологическому эффекту – атеросклерозу, служащий основой инфаркта миокарда и тромбозы. Внезапные повышения уровня солнечной активности и связанная с ним геомагнитная пульсация низкой частоты $10^{-3} - 10$ Гц может вывести больной организм из состояния устойчивого равновесия и обострении болезни.

Особенно, привлекательным в биофизическом плане является воздействие магнитного поля на молекулы гемоглобина крови, так как содержит около 80% железа организма. В связи с этим следует упомянуть о так называемой магнитобиологии, который уже мы упомянули об этом. Магнитные поля могут сильно повлиять на молекул гемоглобина крови. Для этого необходимо знать магнитный момент гемоглобина и энергию магнитного поля.

Магнитный момент, действующий на молекулы гемоглобина равен

$$M = 5,5 M_B = 5,5 \frac{eh}{2mc}, \quad (2.18)$$

где $M_B = \frac{eh}{2mc}$ магнетон Бора.

С другой стороны, магнитный момент равен

$$M = \Delta X \cdot H, \quad (2.19)$$

где ΔX – анизотропия магнитной восприимчивости молекулы гемоглобина, H – напряженность магнитного поля.

Энергия магнитного поля, действующая на молекулы гемоглобина крови равна

$$E_H \frac{1}{2} m_0 N H^2 (X_{\parallel} - X_{\perp}) \cos^2 \varphi = \frac{1}{2} m_0 N H^2 \Delta X \cos^2 \varphi, \quad (2.20)$$

где, m_0 – масса молекулы гемоглобина, N – общее число молекул гемоглобина, кооперативно ориентированные по направлению поля, X_{\parallel} и X_{\perp} – аксиальная и радиальная составляющие магнитной восприимчивости, φ – угол между направлением магнитного поля и осью молекулы гемоглобина.

Если молекулы (направлены) ориентированы по полю, то $\varphi = 0$ и $\cos \varphi = 1$, тогда формула (2.20) принимает вид

$$E_H = \frac{1}{2} m_0 N H^2 \Delta x. \quad (2.21)$$

Подставляя согласно (2.19) вместо $N \Delta x$ значение M , находим

$$E = \frac{1}{2} m_0 N H M. \quad (2.22)$$

Принимая $m_0 = 2,3 \cdot 10^{-23}$ кг, $N = 3,3 \cdot 10^{22}$, $H = 6,4 \cdot 10^3$ А/м и $M = 1,3 \cdot 10^{-23}$ Дж/Тл из (2.22) получим $E_H = 3,2 \cdot 10^{-20}$ Дж.

Это значение больше чем тепловой энергии

$$kT = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 300 \text{ К} = 4,14 \cdot 10^{-21} \text{ Дж.}$$

Это значит, что магнитное поле Земли может повлиять на ориентацию животных.

На основании данных полученных в последнее время можно полагать, что даже люди обладают способностью чувствовать магнитное поле. Исследование позволило обнаружить в области носа человека магнитные частицы, обладающие магнитным чувством. Этим чувством они могут находить неоднородности, скрытые под Землей.

Также следует отметить, что геомагнитная активность может повлиять на скорость движения крови в капиллярах сосудах человека. Такой результат был получен в ходе модельного эксперимента межпланетного полета космического корабля «Марс-500». Оказалось, что в дни с повышенной геомагнитной активностью скорость крови в капиллярах была почти в два раза ниже, чем в магнитные спокойные дни. Такой же результат уменьшения скорости жидкого кристалла экспериментально получил В. Н. Цветков в магнитном поле (рис 5).

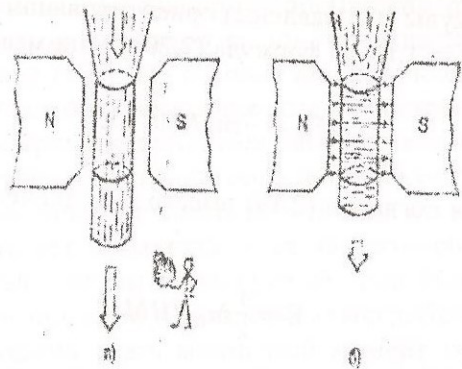


Рис. 5. Вытекание нематика из капилляра в отсутствие магнитного поля (а) и при включении поля (б)

Автором этих строк теоретически установлена формула, которая достаточно хорошо описывает высказывания Цветкова и результатов эксперимента по моделированию межпланетного корабля «Марс-500». Формула имеет вид:

$$U = \frac{const}{B}, \quad (2.23)$$

где U – подвижность крови, B – индукция магнитного поля. Поскольку, подвижность прямо пропорционально скорости, то она уменьшается с ростом индукции магнитного поля.

Если принимать кровь несжимаемой проводящей жидкостью и находящейся в магнитном поле, тогда вдоль силовых линий этого поля образуются магнитогидродинамические волны – волны Альвена со скоростью

$$v_A = \frac{B}{4\pi\rho}, \quad (2.24)$$

где ρ – плотность жидкость крови.

Подставляя значение индукции магнитного поля из (2.23) в выражение (2,24), получим

$$v_A = \frac{const}{U \cdot 4\pi\rho}, \quad (2.25)$$

Отсюда следует, что скорость магнитогидродинамических волн тормозит подвижности крови в капиллярах.

ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ КРОВИ

Кровь, выходя из аорты движется по разветвленной кровеносной системе, выполняет свою непосредственную функцию – снабжать кислородом клетки тканей и забирает от них продукты питания. Кровь доставляет питательные вещества от органов, где они всасываются или хранятся, к месту их потребления. Благодаря высокой теплоемкости, кровь обеспечивает распределение тепла, образующегося в процессе метаболизма и его выделение во внешнюю среду через дыхательные пути, легкие и поверхности кожи.

Кровь при спокойном течение состоит как бы из тонких скользящих друг относительно друга слоев или цилиндров. Такое течение или движение крови называется ламинарным. Особенности ламинарного течения крови является то, что более крупные частицы крови располагаются ближе к оси потока течения. Для того, чтобы легче понимать многие физические явления необходимо знать связь между давлением и скоростью движения крови, зависимость этих величин от характеристик крови. Движущаяся идеальная несжимаемая жидкость характеризуется уравнением Бернулли которое имеет вид:

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + P = \text{const.} \quad (3.1)$$

Это уравнение (3.1) показывает, что полная энергия единица объема потока идеальной жидкости в произвольном сечении потока есть величина постоянная. Но кровь не относится к идеальной жидкости. Она имеет вязкость. По этому если не учесть вязкости, тогда уравнение (3.1) можно применять для течения крови.

Для вязкостного течения жидкости французский физик и

физиолог Ж. М. Пуазейли в 1841 году установил формулу, которая приводится ниже. Пусть кровь течет по горизонтальной трубе с внутренним радиусом R , небольшой отрезок длиной Δx вдаль ее концов. Жидкость течет под действием перепада давления ΔP . Тогда скорость течения жидкости на расстоянии r от оси трубы будет

$$v_p = \frac{\Delta P}{4\eta \Delta x} R^2 - r^2, \quad (3.2)$$

то есть скорости слоев жидкости (крови) распределяются по сечению трубы по параболическому закону, причем центральный слой будут двигаться быстрее, чем периферические. Здесь v_p – выражает скорость установленная Пуазейлем.

Более обстоятельно вопрос течения крови дается в двухфазной математической модели А. Е. Медведева. Он дает для скорости плазмы крови и эритроцитов следующие формулы:

$$v_1 = v r - v_{max} \cdot \frac{2}{9} \frac{S_1}{S_0} \frac{2}{C_1 + \sigma C_2} \frac{\sigma C_1^{n-1}}{C_1 + \sigma C_2}, \quad (3.3)$$

$$v_2 = v r + v_{max} \cdot \frac{2}{9} \frac{S_1}{S_0} \frac{2}{C_1 + \sigma C_2} \frac{C_1^n}{C_1 + \sigma C_2}, \quad (3.4)$$

где $\sigma = \frac{\rho_2^0}{\rho} > 1$ – отношение истинных плотностей эритроцитов и плазмы, $v r$ – скорость крови.

$$S = S_{max}(1 - S r^2),$$

$$S = \frac{S_{max} - S_{min}}{S_{max}},$$

S_{max} и S_{min} – максимальное и минимальное значение площади поперечного сечения эритроцита, n – постоянная величина.

Значения уравнения (3.3) и (3.4) показывают такое поведение эритроцитов в потоке крови, когда на оси сосуда эритроциты повернуты к потоку максимальным сечением, а у стенки сосуда минимальным. При движении эритроциты обгоняют плазму. Скорость кровотока при таком течении максимальна в центре патка и минимальна в его при стеночном слое. При этом более крупные частицы (эритроциты) крови располагаются ближе к оси потока. В результате осевой поток крови в сосуде почти целиком состоит из эритроцитов.

Средняя скорость кровотока в аорте примерно $20 \frac{м}{с}$, в мелких артериях $10-15 \frac{м}{с}$, в капиллярах — $0,03 \frac{м}{с}$. Концентрация эритроцитов C_2 имеет максимум на оси сосуда и минимум на стенке сосуда. Тогда получается в центре сосуда (при $r=0$) $\vartheta 0 < \vartheta_n(0)$, а на стенке ($r=R$) скорость течения крови $\vartheta 1 = \vartheta_n 1 = 0$. Таким образом, профиль скорости течения крови тупой по сравнению с профилем скорости Пуазейля. Это объясняет тупой профиль скорости крови.

Особый интерес представляет давление крови в узких сосудах — капиллярах, толщина которой в 50 раз меньше человеческого волоса. До сегодняшнего дня далеко не все известно о физических свойствах этих микроскопических кровеносных сосудов. Неизвестно, точно упругие свойства и структура их стенок. Во много неясен процесс проталкивания эритроцитов через них, диаметр который значительно превышает диаметр капилляров. По — видимому здесь имеет место сильное эластичное деформации формы эритроцитов. При деформации площадь их соприкосновения со стенками капилляров увеличивается.

Из-за сильной деформации эритроциты принимают нитеобразную форму и могут продвигаться по узким капиллярам. Всего в организме человека насчитывается до 150 миллиардов капилляров и они полностью снабжают тканей кислородом со скоростью $0,3 - 0,5 \frac{мм}{с}$.

3.1. Скорость падения форменных элементов крови в поле тяготения Земли

При равномерном ламинарном течении крови по кровеносной сети на форменные элементы крови (эритроциты, лейкоциты и тромбоциты) действует сила сопротивления Стокса (F_c). Помимо этого на них действует выталкивающая сила Архимеда (F_A), направленная вертикально вверх и сила тяжести (F_T), направленная вертикально вниз.

В соответствие с вторым законом Ньютона для ферментных элементов крови можно записать следующее:

$$F = F_T - F_A - F_c \quad (3.5)$$

где $F = ma$, $F_T = mg$, $F_A = \rho V g$, $F_c = 6\pi\eta r \vartheta$. Поскольку $m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho$ и $V = \frac{4}{3}\pi r^3$, уравнению (3.5) можно придать следующий вид:

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho a = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_z g - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_k g - 6\pi\eta r \vartheta \quad (3.6)$$

По мере падения форменных элементов в поле тяготения скорость движения их возрастает, что приводит к возрастанию силы Стокса. Через определенное время форменные элементы достигают такую скорость, при которой их ускорение становится равным нулю и движение форменных элементов приобретает равномерный характер. При этом уравнение движения (3.6) можем записать в более упрощенном виде:

$$\frac{4}{3}\pi r^3 g (\rho_z - \rho_k) = 6\pi\eta r \vartheta, \quad (3.7)$$

Отсюда скорость падения форменных элементов в поле тяготения Земли будет

$$\vartheta = \frac{D^2 \varphi}{18} \frac{(\rho_{\text{фэ}} - \rho_{\text{к}})}{\eta} \quad (3.8)$$

где $D_{\text{фэ}}$ — диаметр форменного элемента, $\rho_{\text{фэ}}$ — плотность форменных элементов, $\rho_{\text{к}}$ — плотность плазмы крови, η — вязкость крови.

Численное значение скорости падения форменных элементов крови приводится в таблице 3, причем были приняты, что плотность форменных элементов почти одинакова и равна $\rho_{\text{э}} = 1,09 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, Также учитываем, что $\varphi = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$, $\rho_{\text{к}} = 1,05 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ и вязкость крови $\eta = 4 \cdot 10^{-3} \text{П}$.

Таблица 3.

№ пп	Форменные элементы	$D_{\text{фэ}}, \text{м}$	$\vartheta, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	Авторы
1.	Эритроциты	$8 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$	А.С. Белановский
2.	Лейкоциты	$12 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-7}$	В.Г. Михайлов
3.	Лимфоциты	$9 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-7}$	В.Г. Михайлов
4.	Тромбоциты	$2 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$	В.Г. Михайлов

О ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ ФОРМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КРОВИ В ЧЕЛОВЕЧЕСКОМ ОРГАНИЗМЕ

Форменные элементы крови; эритроциты, лейкоциты и тромбоциты необходимые составляющие крови, играют не-оценимую роль в человеческом теле. Поэтому очень важно знать их время существования в непрерывно циркулирующем состоянии крови живого организма.

Теоретически к этому вопросу можно подходит следующим образом. Число конкретного форменного элемента крови dN , распавшихся или разрушающихся за промежуток времени dt , прямо пропорционально времени и общему числу форменного элемента N :

$$dN = -\lambda N dt, \quad (4.1)$$

откуда следует, что

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt. \quad (4.2)$$

Решая уравнение (4.2), находим экспоненциальный закон убывания полного числа конкретного форменного элемента со временем в виде:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (4.3)$$

где N_0 — полное число или количество форменного элемента в момент времени $t=0$, λ -коэффициент пропорциональности или постоянная распада число форменных элементов крови. Обратное значение λ в (4.3), выражает среднее время жизни форменного элемента. Оно легко можно определить по формуле:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{N}{\frac{dN}{dt}}. \quad (4.4)$$

Число распавшихся форменных элементов за единицу времени $\frac{dN}{dt}$ согласно работы В.Г. Михайлова и В.И. Пупковой приводится в таблице 4. Зная значение N и $\frac{dN}{dt}$ можно определить время жизни форменных элементов крови τ . Значение N и τ также дается в таблице 4.

Таблица 4.

№ пп	Форменные элементы	N	$\frac{dN}{dt} \cdot \frac{1}{c}$	τ, c	Авторы
1	Эритроциты	$25 \cdot 10^{12}$	$3,5 \cdot 10^6$	$7,14 \cdot 10^6$	В.Г. Михайлов
2	Лейкоциты	$3 \cdot 10^{10}$	$5,8 \cdot 10^4$	$5,00 \cdot 10^5$	В.И. Пупкова
3	Тромбоциты	$1,5 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^6$	$5,00 \cdot 10^5$	В.Г. Михайлов

Из табличных значений следует, что время жизни форменных элементов в циркулирующем состоянии в организме здорового человека составляет 2 – 3 месяца, что указывается в работе В.И. Пупкова.

При ускоренном распаде эритроцитов, который наблюдается при гемолизе (при болезни), время пребывания эритроцитов в организме резко уменьшается до 14 дней, то есть τ будет иметь значение $1,2 \cdot 10^6 c$. Это означает, что при гемолитической болезни число человеческих эритроцитов сокращается в 6 раз по сравнению со здоровым организмом.

При рассмотрении этого вопроса уместно отметить, что в непрерывно циркулирующем крови организма вместо распавшихся форменных элементов (в каждые сутки в нашем организме гибнет примерно 300 миллиардов эритроцитов, 5 миллиардов лейкоцитов и 250 миллиардов тромбоцитов) непрерывно обновляются или образуются новые форменные

элементы за счет мозгов костей человеческого тела. Из – за этого распад элементов крови в циркулирующем состоянии не чувствуется.

Рассматривая время жизни форменных элементов крови мы получили уравнение (4.3), точно совпадающих со значением радиоактивного распада химических элементов. Как это можно объяснить?

Известно, что все живые на Земле находятся под постоянным воздействием излучений от рассеянных в окружающей нас природе радиоактивных нуклидов. Этот вопрос специально рассматривается в книгах А.М. Кузина, И. С. Королюка и Цыба А., где приводится, что человеческий организм за год получает 60 мРад. радиоактивного излучений.

Длительно живущие радиоактивные элементы – Уран, Радий, Свинец – 210 составляет значительную часть земного излучения. Радон постоянно присутствует в приземном воздухе при его выдыхании. Углероды, жиры, белки и другие компоненты растений содержащие углерод, будут слабо радиоактивным (содержать C^{14}), и поступая в качестве пищи в организм человека создают постоянно действующий уровень внутреннего облучения.

Весьма значительный вклад в суммарную радиоактивность вносит радиоактивный изотоп Калия K^{40} . Без присутствия данного изотопа не происходит нормального развития организмов и их жизни. Существуют специальные механизмы, работающие в биологических мембранах, которые регулируют распределение изотопа калия (K^{40}) в человеческом организме. Его содержание в эритроцитах крови достигает – 460 мг %, в мышцах – 360 мг %, в головном мозге – 330 мг %.

В организме человека с растительной пищей попадет Уран в количестве 0,2 – 0,9 Пки за день. Он больше всего попадет в организм с водой и откладывается в костной ткани. Очень немного Радона растворяется в крови и разносится по внутренним органам.

В 1942 году английскими исследователями И. Хевеш и

К. Зерану удалось пометить эритроциты крови радиоактивным фосфором – 32. Такие эритроциты введение в организм человека, ни чем не отличается от своих немеченых собратьев и живут по тем же биологическим законом.

Но у них есть одна важная особенность: их в любое время можно распознавать по испускаемой ими радиации. Для этого брали у человека пробу крови и поместили в радиометр. Есть радиоактивность – есть жизнь эритроцитов. Если же ее нет, эритроциты погибают.

Исходя из выше изложенного, можно сделать следующие заключения: на время жизни форменных элементов в какой-то степени влияет внутреннее радиоактивные излучения организма, полученные от естественных природных радиоактивных нуклидов.

ОСНОВЫ ФИЗИКИ МЕМБРАНЫ КЛЕТКИ КРОВИ

Биологическая мембрана клетки представляет собой динамическую сложно организованную систему, обеспечивающая определенный порядок расположения макромолекул жизни, определенный образ взаимодействия этих молекул друг с другом, а также ограничивающей внутреннее содержимое клетки от внешней среды.

Современные структурные исследования показывают, что биомембраны являются материалы лиотропные ламелярные жидкокристаллических структур, в котором растворены белки, липиды и углеводы. Все компоненты ответственные за биологическую функциональность мембраны, локализованы на поверхности или в ее толще. Толщина мембраны составляет примерно 10 нанометр (Один нанометр равен 10^{-9} м), что существенно меньше ее протяженности в длину и ширину.

Биологическая мембрана не является только пассивной оболочкой клетки и её органеллы, но она активно принимает участие во всех внутриклеточных процессах. С мембранами связаны основные биологические процессы – окислительное фосфорилирование, фотосинтез, генерация биопотенциалов, механизмы зрения распространение нервных импульсов, работа мышц и т.д.

5.1. Компоненты мембраны клетки

Биомембрана клетки по структуре многокомпонентна. Она в основном состоит из белков, липидов и углеводов. В частности, относительное содержание белков и липидов в мембране эритроцитов человека следующее: белки 49 процентов, липиды 44 процента. Причем, в мембранах эритроцитов 30 процентов липидов образует холестерин, не менее 20 видов

лецитина. Только содержание холестерина в мембране клетки сохраняет фосфолипидов в жидком состоянии. Велика и скорость вращения липидов в мембранах эритроцитов, поворот молекулы примерно на один радиан происходит за время τ_c , которое равно 10^{-9} с.

Важным структурным компонентом мембраны является также вода, взаимодействия с которой определяет не только само формирование мембраны, но многие ее структурные и функциональные свойства. Это внутренняя связанная вода, вода гидратных оболочек полярных областей белков и липидов и слабо связанная вода.

Сейчас подробно в отдельности рассмотрим компоненты или структуры мембран.

а. Белки

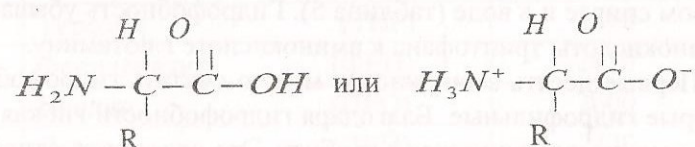
Как известно, носителями жизни на Земле являются живые организмы, главная составная часть которых являются белки. В частности в организме человека насчитывается 5 миллионов различных белков, которые бесконечно разнообразны по своему строению и функциям. Белки – это сложные высокомолекулярные соединения гетерополимерной структуры, выполняющие в живых системах самые разнообразные функции. Они в организме регулируют метаболические процессы, являясь катализаторами химических реакций.

Белки в клетке являются основными рабочими молекулами. Почти весь строительный материал клетки имеет белковую природу. Даже хромосомы на половину состоят из белков. Благодаря способностям к избирательным взаимодействиям с другими молекулами, белки обеспечивают биогенез всех структурных и функциональных компонентов живых систем, осуществляют механико-химические процессы, являются запасными соединениями, выполняют сигнальные функции (гормоны).

В состав белков входят от 100 до 500 аминокислот и относительная молекулярная масса мембранных белков находится в основном в пределах от 10000 до 50000. Около трети бел-

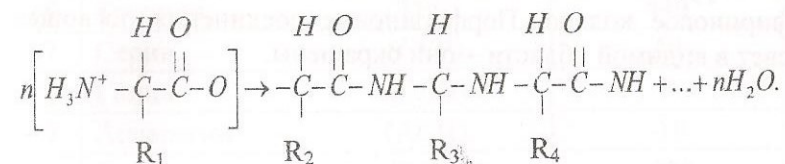
ков мембран эритроцитов крови составляет спектрин, в котором имеются молекулярные массы с 220000 до 250 000. Белки занимают от 70 до 80 процентов поверхности мембран. Белковые молекулы покрывают мембрану с обеих сторон, придавая ей эластичность к механическим повреждениям.

Структурные единицы, из которых образовались белки это остатки 20 аминокислот. Аминокислоты, остатки которых входят в белки, имеют структурную формулу:



где R – органический радикал (углеводородный, содержащий водород, кислород, азот и серу). Радикал R имеет сложное строение. Приведем примеры: CH_3 (аланил), $-\text{CH}_2\text{OH}$ (серил), $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{S}-\text{CH}_3$ (метионил), $-\text{CH}_2-\text{CO}-\text{NH}_2$ (аспарагенил), $-\text{CH}_2-\text{COO}^-$ (аспартил), $-(\text{CH}_2)_4-\text{N}^+\text{H}_3$ (лизил). Из двух последних примеров ясно, что белковые цепи могут содержать как положительно, так и отрицательно заряженные звенья.

Поликонденсация аминокислот приводят к образованию белковой и полипептидной цепи:



При этом образуются пептидные связи. Цепи из аминокислотных остатков называются полипептидами. Один или несколько полипептидных цепей образует макромолекулу белка. Последовательность аминокислотных остатков в полипептидной цепи белковой молекулы называется первичной структурой белка.

В функциональном отношении мембранные белки подразделяются на ферментативные, транспортные и регуляторные. Белки функционируют с водной средой и нельзя игнорировать влияние воды на их строения. Среди 20 аминокислотных остатков имеются гидрофобные нерастворимые в воде и гидрофильные «любящие» воды. Установлена степень гидрофобности «вражды» к воде всех аминокислот. Её мера разность свободных энергии растворения аминокислоты в этиловом спирте и в воде (таблица 5). Гидрофобность убывает от аминокислоты триптофана к аминокислоте глутамину.

Первые десять аминокислот можно считать гидрофобные, вторые гидрофильные. Благодаря гидрофобности гибкая белковая цепь сворачивается в глобулу. Это относится, отчасти и к миоглобину и гемоглобину крови. Глобула формируется слабыми электростатическими, Ван-дер-ваалсовыми силами а также водородными связями и, прежде всего гидрофобными взаимодействиями. Благодаря гидрофобным взаимодействиям гибкая белковая цепь сворачивается в глобулу таким образом, что гидрофобные остатки оказываются в центральной части глобулы. В частности молекула гемоглобина состоит из 4 глобул двух сортов (2 α цепи и 2 β цепи).

Белки миоглобина и гемоглобина служат организму для запасаания молекулярного кислорода, который присоединяется к группе гемма связанной с белком. Гемм содержит порфириновое кольцо. Порфириновые соединения поглощают свет в видимой области – они окрашены.

Таблица 5.

Гидрофобность аминокислот

№ п/п	Аминокислоты	Разность своб.энергии ΔG , кал/моль
1	Триптафан (ТРИ)	3000
2	Изолейцин (ИЛЕ)	2970
3	Тирозин (ТИР)	2870
4	Фенилаланин (ФЕН)	2650
5	Пролин (ПРО)	2600
6	Лейцин (ЛЕЙ)	2420
7	Валин (ВАЛ)	1690
8	Лизин (ЛИЗ)	1500
9	Гистидин (ГИС)	1400
10	Метионин (МЕТ)	1300
11	Аланин (АЛА)	730
12	Аргинин (АРГ)	730
13	Цистеин (ЦИС)	650
14	Глутаминовая кислота(ГЛУ)	550
15	Аспарагиновая кислота (АСП)	540
16	Треонин (ТРЕ)	440
17	Серин (СЕР)	40
18	Глицин (ГЛИ)	0
19	Аспарагин (АСН)	-10
20	Глутамин (ГЛН)	-100

В центре кольца расположен атом железа, с которым связан кислород. Группа гемма содержится в гемоглобине крови, в дыхательных ферментах, цитохромах и т.д.

6. Липиды

Биологические липиды — низкомолекулярные вещества близки по своим свойствам к жирам. Характерная особенность липидов состоит в том, что они построены из «головки» несущей электрического заряда и длинных электрически нейтральных «хвостов». Липиды в мембране движутся. За одну секунду каждая липидная молекула миллион раз обменивается местами со своими соседями.

Особое место среди липидов занимает холестерин. Молекулы его, как и другие липидные молекулы имеют полярную головку и вытянутую в длину не полярную часть, поэтому они хорошо встраиваются в липидные ансамбли, образующие клеточную мембрану.

Молекул холестерина, по сценки Хуанга имеет размеры $20 \times 7 \times 5 \text{ \AA}$. Длина его жесткого ядра равна 9 \AA ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$), а всей гидрофобной части 17 \AA , что очень близко к размеру гидрофобной части лавриновых и миристиновых кислот. Химическая формула холестерина дано на рисунке 6.

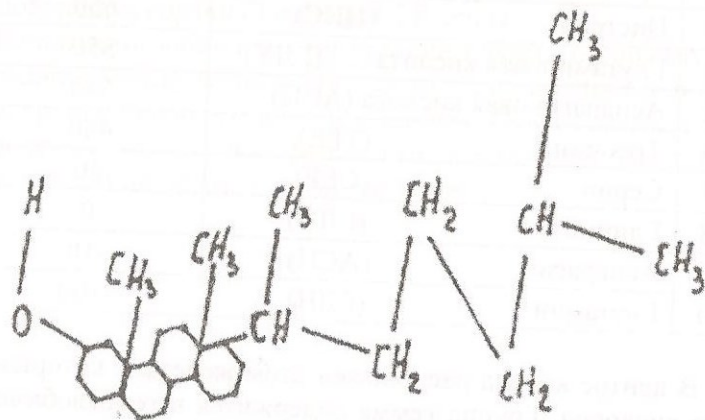


Рис. 6. Холестерин

Очень высокое содержание холестерина в мембранах эритроцитов объясняется необходимостью защиты бислой от внедрения высшего белка, в данном случае гемоглобина. Действие холестерина зависит от фазового состояния мембранных липидов. При температурах выше фазового перехода, холестерин оказывает конденсирующее действие на монослой.

Холестерин снимает фазовый переход и тем самым уменьшает проницаемость для глицерина. Включение холестерина в биологической мембране приводит к возрастанию плотности упаковки и анизотропии движения углеводородных цепей и одновременно к возрастанию подвижности полярных «голов».

Минерал лецитин снижает холестерин в крови, улучшает память способствует нормальному желчеотделению и высыванию в кишечнике жирных кислот. Чем выше уровень кислотности в крови, тем более положительно заряженными становятся мембраны эритроцитов крови и тем сильнее они слипаются между собой; чем длиннее и теснее они слипаются, тем кислее будет кровь.

Изменение содержания холестерина в органах и тканях может привести к тяжелым заболеваниям. Так, при желчно-каменной болезни в желчном пузыре и печени откладываются камни, состоящие из чистого холестерина. В частности, в плазматической мембране клеток печени холестерин составляет почти 30 процентов всех липидов в мембране. При атеросклерозе повышается содержание холестерина в крови и их осадки на стенках сосудов может привести к сужению сосудов и даже их закупорки.

Липиды очень плохо растворяются как в полярном растворителе — воде, так и в неполярной среде — масле. Самое выгодное для них расположение мономолекулярного слоя на поверхности между водой и маслом. В этом случае их неполярные хвосты погружены в масло. Если липиды находятся в водной среде их молекулы объединяются друг с другом в

микроскопические капельки — мицеллы, у которых полярные головки обращены наружу, а неполярные хвосты упрятаны внутрь в масле. Если концентрация липидов в воде высока, мицеллы слипаются и возникает плоский бимолекулярный слой (рис. 7).

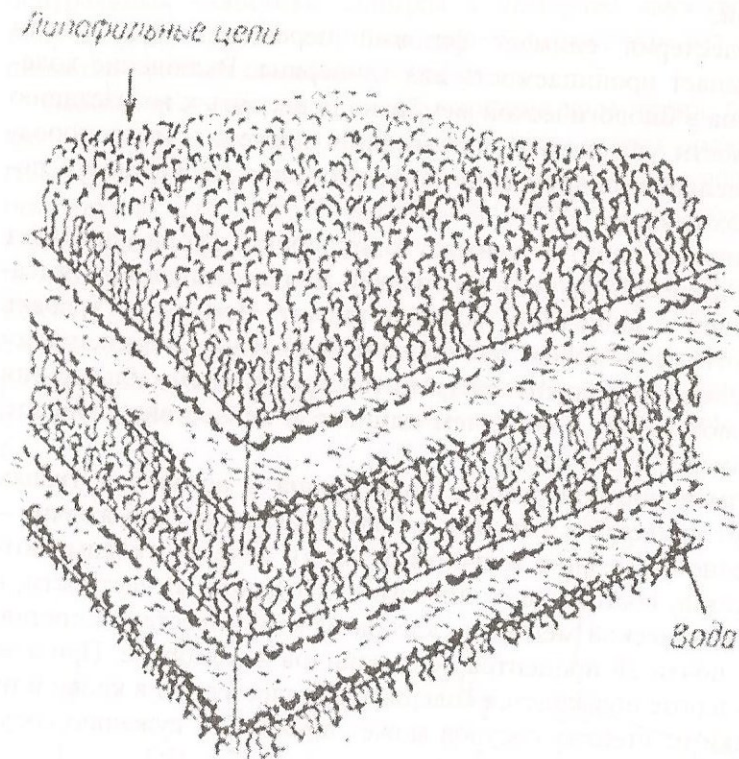


Рис. 7. Схематическое изображение ламелярной упаковки амфифильных молекул в воде.
(По работе Rosevear, 1968, с изменениями)

На поверхности воды — воздух, липиды образуют мономолекулярную пленку. При сжатии пленки, ее площадь постепенно уменьшается. При этом молекулы упакованы плотно, их неподвижные цепи находятся в жидкокристаллическом состоянии. При малом содержании воды, липиды могут образовывать все три основных типа жидкокристаллических структур: смектические, нематические и холестерические.

При биологических температурах мембранные липиды находятся в жидкокристаллическом и при понижении температуры переходят в кристаллическое состояние. Точку перехода часто называемой температурой фазового перехода.

Главным компонентом клеточных мембран, ответственных за текучесть клеточных липидов является холестерин. Взаимодействия его с липидами, особенно с лецитином, находящимся в жидкокристаллическом состоянии, влияет на упорядоченное расположение углеводородных цепей, поэтому увеличение концентрации холестерина приводит к увеличению температуры фазового перехода природных мембран.

Разные изменения функциональных свойств и физических характеристик мембраны может происходить в области между 10^0 - 30^0 °C. Такие перестройки были обнаружены в мембранах эритроцитов. Эти перестройки обусловлены кристаллизацией мембранных липидов, переходами гель — жидкий кристалл.

Липиды бывают различных видов: фосфолипиды, серинголипиды, гэнколипиды, термидные липиды и стероиды. Из результатов химического анализа липидов стало ясно, что в состав липидов больше всего содержится фосфаты — диэтаноламин, фосфатидилхолин и холестерин (Таблица 6). Природные жиры, относящиеся к липидам, представляют собой триглицериды жирных кислот, в частности, глицерид стеариновой кислоты $H_3(CH_2)_{16}COOH$. Ряд важных соединений относятся к фосфолипидам. Одним из них является сфингомиелина, являющаяся важнейшим элементом головного мозга. Так среди олигопептидов мозга млекопитающих есть стиму-

ляторы памяти, сна, аналгетика (устраняет чувство боли) и т.д. Смесь фосфатидилхолина с водой претерпевает фазовый переход от мутного раствора к прозрачному, т.е. получает свойство жидкого кристалла.

Ряд классических исследований полипептидов, как жидкокристаллических систем, выполнен Робертсоном изучившим свойства Поли- γ -бензил-L-глутамата (ПБГ) в растворителях. Растворы (ПБГ) обладают двулучепреломлением. В этих растворах выявляются узкие параллельные полосы по переменно светлые и темные, наподобие оптической картины Капустина и Вилимса, наблюдающиеся в холестерическом жидком кристалле.

Исследования показывает, что растворенное вещество имеет закрученную спиральную структуру, шаг, которой можно находить оптическим способом. При увеличении концентрации (ПБГ) в растворе, шаг спирали уменьшается. Это сохраняется всегда, пока система сохраняет свойства холестерического жидкого кристалла.

Используя флуориентные зонды можно изучать вязкость не только мембран но и липидов в липопротеидах плазмы крови. Метод основан на измерении эксимирзации флуоресцентного зонда между степенью эксимирзации зонда Пирена. Между степенью эксимирзации зонда Пирена и вязкостью имеется обратная зависимость

$$\frac{k_s c}{k_s^0 c_0} = \frac{\eta_0}{\eta}, \text{ причем } k_s = \frac{I_s}{I_m} \quad (5.1)$$

где η_0 — вязкость стандартного раствора, η — вязкость липидов в мембранах, c_0 и c — концентрация зонда в растворе и мембране, k_s^0 и k_s — коэффициенты эксимирзации, I_s и I_m — интенсивность флуоресценции в максимумах эксимера и мономера.

С другой стороны из графического результата эксперимента следует, что

$$k_s = \frac{1}{B} \frac{m_s}{m_{xc}} \quad (5.2)$$

где B — постоянная величина, m_s — масса липида, m_{xc} — масса холестерина в липопротоидах. Из (5.1) и (5.2) можно получить

$$\eta = \eta_0 \frac{k_s^0 c_0}{c} \frac{I_m}{I_s} = \eta_0 B \frac{k_s^0 c_0}{c} \frac{m_{xc}}{m_s}. \quad (5.3)$$

Была измерена микровязкость липидного слоя в мембранах эритроцитов крови, нервных волокон, митохондрии, соркоплазматического ретикулула и т.д. Она оказалась равной 30-100 мПа·с, т.е. близкий к вязкости подсолнечного масла.

Поверхностный монослой липидов широко используют в качестве модельных мембранных систем. С их помощью можно изучать подвижность и типы упаковки молекулярных компонентов в мембранах. Исследовать кинетику и механизмы ферментативных процессов, протекающих на границе раздела фаз и т.п.

Молекулярные компоненты в мембранах сохраняют индивидуальную подвижность и могут диффузионным путем передвигаться в пределах мембран. Диффузионное перемещение молекул липидов вдоль мембраны называемое латеральной диффузией, совершается довольно быстро. Коэффициент диффузии согласно Стокса — Эйнштейна для протеина и липида определяется по формуле

$$D_n = \sqrt{\frac{\mu_n}{\mu_p}} \cdot D_p \quad (5.4)$$

где D_n — коэффициент латеральной диффузии протеина,

D_n — коэффициенты диффузии липида, μ_n и μ_λ — молекулярные массы протеина и липида. При $\mu_\lambda = 1000$ и $\mu_n = 100000$ и $D_\lambda = 10^{-7} \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$ можем получить $D_n = 10^{-8} \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$.

Молекулы липидов наиболее легко совершают вращательное движение вокруг своей длинной оси. Время корреляции вращательного движения τ_c молекул в различных мембранах, находящихся в жидком состоянии составляет 10^{-9} с. Для изотропного вращения зонда время корреляции линейно связано с вязкостью

$$\tau_c = \frac{4\pi\eta r^3}{3kT}, \quad (5.5)$$

где r — эффективный радиус зонда, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура.

в. Углеводы

Другой вид биомолекулы — углеводы или полисахариды, играют важнейшую роль в метаболизме растений и животных, в частности глюкоза. Углеводы являются главным источником энергии для живых организмов. Они могут служить резервным «топливом» в клетке. Углеводы разделяются на моно-, ди-, и полисахаридов. Моносахариды в свою очередь классифицируются по числу атомов углерода в молекуле. Полисахариды ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$) крахмал и целлюлоза в растениях, хитин, гликоген в организме животных являются продуктами конденсации многих молекул моносахаридов.

Полисахариды играют важную роль в наружных мембранах некоторых клеток. Они вместе с водой могут образовать жидкие кристаллы. Микровязкость углеводородной области липидного слоя мембраны приводится в таблице 7.

Таблица 7.

Микровязкость Липидного слоя мембраны

Объект	Вязкость, П	Температура, С	Метод измерения
Эритроциты человека	2,5	37	Флуоресцентный зонд
«Тени» Эритроцитов	3,8	37	То же
Мембраны E.coli	2,5	Температура роста	ЭПР — Спиновой зонд
Яичный Лецитин	0,73	37	Деполаризация флуоресценции перилена
Дипальми толлецитин	3,9	37	
Льняное масло	0,331	30	-
Оливковое масло	0,84	30	
Касторовое масло	9,86	30	
Глицерин	8,3	30	
Вода	0,0106	30	

5.2. Перенос вещества через биомембран клетки

Перенос веществ через биомембран — необходимые условия жизни. С переносом связаны метаболизм клетки, биоэнергетические процессы, образования биопотенциалов, генерации нервного импульса и т.д. Перенос вещества через биологические мембраны может осуществляться путем диффузии т.е. самопроизвольного перехода вещества из области с большей концентрацией в область с меньшей концентрацией. В направлении градиента концентрации происходит равномерное распределение вещества по занимаемому объему.

Интенсивность диффузионного потока можно записать в виде

$$\Phi = \frac{1}{S} \frac{dn}{dt} = -Uc \frac{\partial \mu}{\partial x}, \quad (5.6)$$

т.е. в качестве движущей силы в вели градиент химического потенциала. В уравнение (5.6) U – подвижность молекулы, c – концентрацией раствора в точке x в момент времени t . Используя выражения для химического потенциала молекул в разбавленном растворе $\mu = \mu_0 + RT \ln c$, уравнение (5.6) записываем в виде

$$-\frac{1}{S} \frac{dn}{dt} = UCRT \frac{\partial \ln c}{\partial x} \quad (5.7)$$

но так как $\partial \ln c = \frac{\partial c}{c}$, будем иметь

$$\frac{1}{S} \frac{dn}{dt} = -RTU \frac{\partial c}{\partial x}, \quad (5.8)$$

где S – площадь сечения, через которое осуществляется перенос растворенного вещества, R – газовая постоянная, T – температура. Обозначив через D значение RTU будем иметь

$$\Phi = \frac{1}{S} \frac{dn}{dt} = -D \frac{\partial c}{\partial x}, \quad (5.9)$$

где D коэффициент диффузии, $\frac{\partial c}{\partial x}$ – градиент концентрации растворенного вещества в данном направлении.

Так как биомембрана имеют две плоскости расположенные перпендикулярно относительно оси x и пересекающие её в точках x и $x+dx$ с градиентом концентрации $\frac{\partial c}{\partial x}$ в первой плоскости и

$$\frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial(\partial c / \partial x)}{\partial x} dx = \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} dx,$$

во второй плоскости.

Диффузионные потоки вещества через эти плоскости равны соответственно

$$\frac{1}{S} \frac{dn}{dt} = -D \frac{\partial c}{\partial x},$$

$$\frac{1}{S} \frac{dn'}{dt} = -D \left(\frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} dx \right).$$

Из разности этих потоков будем иметь

$$\frac{1}{S} \frac{dn - dn'}{dt} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} dx \quad (5.10)$$

или

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{S dx} \frac{dn - dn'}{dt} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (5.11)$$

Таким образом, был получен закон Фика для диффузионного процесса, который широко используется в биологической мембране.

Решение уравнения (5.11) можно искать в виде

$$C(x;t) = \frac{n}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right). \quad (5.12)$$

Производный $C(x;t)$ по x и t будет давать

$$\frac{\partial C(x;t)}{\partial t} = \frac{n}{\sqrt{4\pi D}} \frac{\left(\frac{\sqrt{t}x^2}{4Dt^2} - \frac{1}{2\sqrt{t}}\right)}{t} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (5.13)$$

$$\frac{\partial c(x;t)}{\partial x} = \frac{n}{\sqrt{4\pi Dt}} \left(-\frac{x^2}{2Dt}\right) \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right),$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 c(x;t)}{\partial x^2} &= \frac{n}{\sqrt{4\pi Dt}} \frac{\left(\frac{x^2}{4D^2t^2} - \frac{1}{2Dt}\right)}{\sqrt{t}} \sqrt{t} \exp\left(-\frac{x^2}{4\pi D^2}\right) = \\ &= \frac{n}{\sqrt{4\pi D}} \frac{1}{D} \cdot \frac{\left(\frac{\sqrt{t}x^2}{4Dt^2} - \frac{1}{2\sqrt{t}}\right)}{t} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) = \frac{1}{D} \frac{\partial c(x;t)}{\partial t}. \end{aligned} \quad (5.14)$$

Откуда следует, что

$$\frac{\partial c(x;t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c(x;t)}{\partial x^2}. \quad (5.15)$$

Среднюю величину квадрату смещения частиц при диффузии поперек биомембраны можем находить по формуле

$$\overline{x^2} = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{4Dt}} x^2 dx = 2Dt \quad (5.16)$$

Среднее значение диффузионного смещения для большинство малых молекул при коэффициенте диффузии порядка 10^{-5} см²/с, равно $4,4 \cdot 10^{-6}$ м за 1 с.

5.3. Электродиффузионный перенос ионов через биологические мембраны

В электродиффузионной теории мембрану рассматривают как непрерывную гомогенную среду, где происходят диффузии точечных не взаимодействующих заряженных частиц. Диффузия заряженных частиц, ионов зависит не только от концентрационного градиента, но и от электрического градиента мембраны. В связи с этим перенос ионов может происходить в направлении противоположенном градиенту концентрации.

Суммарный электродиффузионный поток ионов движущихся в такой гомогенной среде в направлении оси x равен

$$\Phi_{\text{эд}} = -CU \frac{\partial \tilde{\mu}}{\partial x}, \quad (5.17)$$

где $\frac{\partial \tilde{\mu}}{\partial x}$ — движущая сила при электродиффузии. Учитывая, что электрохимический потенциал (т.е. величина численно равная энергии Гипса на один моль данного вещества, помещенного в электрическом поле) равен

$$\tilde{\mu} = \mu_0 + RT \ln c + zF\varphi, \quad (5.18)$$

выражение (5.17) можно записать в виде

$$\Phi_{\text{эд}} = -RTU \frac{\partial c}{\partial x} + UczF \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad (5.19)$$

где z — валентность иона, F — число Фарадея, φ — электрический потенциал.

Для разности потенциалов в непрерывном гомогенном биологическом мембране при постоянном градиенте концентрации отдельных ионов теоретически впервые разработал Гендерсон. При этом для условия линейной зависимости

концентрации каждого вида иона от расстояния можно записать в виде

$$c_i = c_{i_0} + \frac{c_{i_1} - c_{i_0}}{d} x \quad (5.20)$$

и градиент концентрации данного вида иона равен

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{c_{i_1} - c_{i_0}}{d}, \quad (5.21)$$

где d — толщина мембраны.

Подставляя (5.21) в (5.19) будем иметь

$$\begin{aligned} \Phi_i = -RTU_i \frac{\partial c}{\partial x} - z_i F C_i U_i \frac{\partial \varphi}{\partial x} = -RTU_i \frac{c_{i_1} - c_{i_0}}{d} - \\ - z_i F U_i \left(c_{i_0} + \frac{c_{i_1} - c_{i_0}}{d} x \right) \frac{\partial \varphi}{\partial x}. \end{aligned} \quad (5.22)$$

Когда внешняя электрическая цепь разомкнута то в условиях стационарного режима электрический ток через мембрану не течет, т.е.

$$\sum_{i=1}^n z_i \Phi_i = 0 \quad (5.23)$$

и естественно

$$\begin{aligned} \frac{RT}{d} \left(\sum_{i=1}^n z_i U_i C_{i_1} - \sum_{i=1}^n z_i U_i C_{i_0} \right) + \frac{\partial \varphi}{\partial x} F \left[\sum_{i=1}^n z_i^2 U_i C_{i_0} + \frac{x}{d} \cdot \right. \\ \left. \cdot \left(\sum_{i=1}^n z_i^2 U_i C_{i_1} - \sum_{i=1}^n z_i^2 U_i C_{i_0} \right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (5.24)$$

После разделения переменных и интегрирования (5.24)

$$\begin{aligned} \int_{\varphi_0}^{\varphi} d\varphi = -\frac{RT}{F \cdot d} \int_0^d \left(\sum_{i=1}^n z_i U_i C_{i_1} - \sum_{i=1}^n z_i U_i C_{i_0} \right) \times \\ \times \frac{dx}{\left[\sum_{i=1}^n z_i^2 U_i C_{i_0} + \frac{x}{d} \left(\sum_{i=1}^n z_i^2 U_i C_{i_1} - \sum_{i=1}^n z_i^2 U_i C_{i_0} \right) \right]}, \end{aligned} \quad (5.25)$$

будем иметь

$$\varphi_1 - \varphi_0 = \frac{RT}{F} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n z_i U_i C_{i_1} - \sum_{i=1}^n z_i U_i C_{i_0}}{\sum_{i=1}^n z_i^2 U_i C_{i_1} - \sum_{i=1}^n z_i^2 U_i C_{i_0}} \ln \frac{\sum_{i=1}^n z_i^2 U_i C_{i_1}}{\sum_{i=1}^n z_i^2 U_i C_{i_0}}, \quad (5.26)$$

Это и есть уравнение Гендерсона для разности потенциалов в биологической мембране.

Уравнение Гендерсона пригодно для мембран макроскопической толщины, но непригодно в случае тонких клеточных мембран. Для таких тоненьких мембран выражение для разности потенциалов при постоянном электрическом поле в уравнении (5.19) можно записать

$$\frac{d\varphi}{dx} = \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{d} \quad (5.27)$$

Подставляя это выражение в (5.19) будем иметь

$$\Phi_i = -RTU_i \frac{dc_i}{dx} - z_i F U_i C_i \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{d} \quad (5.28)$$

Разделив переменные и проинтегрировав (5.28) от $x=0$ ($c_i = c_{i_0}$) до $x=d$ ($c_i = c_{i_1}$)

$$\int_0^d dx = -RTU_i \int_{c_{i0}}^{c_{i1}} \frac{dc_i}{\Phi_i + z_i F U_i \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{d} c_i} \quad (5.29)$$

получим следующее

$$d = \frac{RTd}{z_i \cdot F(\varphi_1 - \varphi_0)_i} \ln \frac{\Phi_i + z_i F U_i c_{i1} \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{d}}{\Phi_i + z_i F U_i c_{i0} \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{d}}, \quad (5.30)$$

откуда следует выражение

$$\Phi_i = z_i F U_i \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{d} \cdot \frac{c_{i1} - c_{i0} \cdot \exp\left[\frac{z_i F(\varphi_1 - \varphi_0)}{RT}\right]}{\exp\left[\frac{z_i F(\varphi_1 - \varphi_0)}{RT}\right] - 1} \quad (5.31)$$

Для вычисления разности потенциалов в биомембране при постоянном поле и разомкнутой внешней цепи сумма токов всех ионов будет равна нулю, т.е.

$$\sum_{i=1}^n z_i F \Phi_i = 0. \quad (5.32)$$

В случае, когда система содержит одновалентные ионы, ток создаваемый катионами и анионами можно записать в виде

$$F\Phi_i = F^2 U_i \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{d} \cdot \frac{c_{i+} - c_{i-} \cdot \exp\left[-\frac{F(\varphi_1 - \varphi_0)}{RT}\right]}{\exp\left[-\frac{F(\varphi_1 - \varphi_0)}{RT}\right] - 1} \quad (5.33)$$

$$F\Phi_i = -F^2 U_i \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{d} \cdot \frac{c_{i-} - c_{i0} \cdot \exp\left[\frac{F(\varphi_1 - \varphi_0)}{RT}\right]}{\exp\left[\frac{F(\varphi_1 - \varphi_0)}{RT}\right] - 1}. \quad (5.34)$$

Учитывая условие (5.32), что

$$\sum_{i=1}^n \Phi_{i+} F + \sum_{i=1}^n \Phi_{i-} F = 0, \quad (5.35)$$

можем иметь

$$\sum_{i=1}^n U_i C_{i+} - \sum_{i=1}^n U_i C_{i-} \cdot \exp\left[-\frac{F(\varphi_1 - \varphi_0)}{RT}\right] = \sum_{i=1}^n U_i C_{i-} \cdot \exp\left[\frac{F(\varphi_1 - \varphi_0)}{RT}\right] - \sum_{i=1}^n U_i C_{i+}, \quad (5.36)$$

или

$$\exp\left[-\frac{F(\varphi_1 - \varphi_0)}{RT}\right] = \frac{\sum_{i=1}^n U_{i+} C_{i+} + \sum_{i=1}^n U_{i-} C_{i0}}{\sum_{i=1}^n U_{i+} C_{i0} + \sum_{i=1}^n U_{i-} C_{i+}}. \quad (5.37)$$

В итоге будем иметь

$$\varphi_1 - \varphi_0 = \frac{RT}{F} \ln \frac{\sum_{i=1}^n U_{i+} C_{i0} + \sum_{i=1}^n U_{i-} C_{i+}}{\sum_{i=1}^n U_{i+} C_{i+} + \sum_{i=1}^n U_{i-} C_{i0}} \quad (5.38)$$

Уравнение (5.38) впервые установил Гольдман и получило название уравнение Гольдмана для расчета электрического потенциала тоненьких клеточных мембран.

Поскольку в биомембранах обычно преобладают ионы K^+ , Na^+ и Cl^- для них разность потенциалов записывается в виде

$$\varphi_1 - \varphi_0 = \frac{RT}{F} \ln \frac{U_{k^+} C_{k_0^+} + U_{Na^+} C_{Na_0^+} + U_{ce^-} C_{ce_1^-}}{U_{k^+} C_{k_1^+} + U_{Na^+} C_{Na_1^+} + U_{ce^-} C_{ce_0^-}}. \quad (5.39)$$

В условиях термодинамического равновесия для ионов K^+ и Na^+ потоки в обоих направлениях одинаковы и ток для них равен нулю. Внутри мембраны находятся только ионы хлора, тогда имеем

$$\varphi_1 - \varphi_0 = \frac{RT}{F} \ln \frac{c_{ce_1^-}}{c_{ce_0^-}} \quad (5.40)$$

Принимая $c_{ce_1^-} = 100 \text{ мМ}$, $c_{ce_0^-} = 10 \text{ мМ}$, $R = 8,3 \text{ Дж/К} \cdot \text{моль}$ и $F = 9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл/г-экв}$ находим $\varphi_1 - \varphi_0 = 62 \text{ мВ}$.

Для установления связи между концентрациями ионов в двух пограничных областях внутри мембраны и снаружи при условии равновесия на наружной поверхности мембраны можно использовать аналитические выражения, как равенство электрохимических потенциалов ионов k^+ , Na^+ и Cl^- в виде

$$\left. \begin{aligned} \mu'_{0k^+} + RT \ln [k^+]_0 + F\varphi'_0 &= \mu_{0k^+} + RT \ln C_{k_0^+} + F\varphi_0, \\ \mu'_{0Na^+} + RT \ln [Na^+]_0 + F\varphi'_0 &= \mu_{0Na^+} + RT \ln C_{Na_0^+} + F\varphi_0, \\ \mu'_{0Cl^-} + RT \ln [Cl^-]_0 + F\varphi'_0 &= \mu_{0Cl^-} + RT \ln C_{cl_0^-} + F\varphi_0, \end{aligned} \right\} \quad (5.41)$$

Из этого выражения следует

$$\left. \begin{aligned} \ln C_{k_0^+} &= \frac{\mu'_{0k^+} - \mu_{0k^+}}{RT} + \ln [k^+]_0 + \frac{F(\varphi'_0 - \varphi_0)}{RT}, \\ \ln C_{Na_0^+} &= \frac{\mu'_{0Na^+} - \mu_{0Na^+}}{RT} + \ln [Na^+]_0 + \frac{F(\varphi'_0 - \varphi_0)}{RT}, \\ \ln C_{Cl_0^-} &= \frac{\mu'_{0Cl^-} - \mu_{0Cl^-}}{RT} + \ln [Cl^-]_0 + \frac{F(\varphi'_0 - \varphi_0)}{RT} \end{aligned} \right\} \quad (5.42)$$

откуда имеем

$$\left. \begin{aligned} C_{k_0^+} &= \exp \left(\frac{\mu'_{0k^+} - \mu_{0k^+}}{RT} \right) \cdot [k^+]_0 \cdot \exp \left[\frac{F(\varphi'_0 - \varphi_0)}{RT} \right] = K_{k^+} [K^+]_0 \exp \left[-\frac{FE_0}{RT} \right], \\ C_{k_1^+} &= \exp \left(\frac{\mu'_{0k^+} - \mu_{0k^+}}{RT} \right) \cdot [k^+]_1 \cdot \exp \left[\frac{F(\varphi'_0 - \varphi_0)}{RT} \right] = K_{k^+} [K^+]_1 \exp \left[\frac{FE_1}{RT} \right], \\ C_{Na_0^+} &= \exp \left(\frac{\mu'_{0Na^+} - \mu_{0Na^+}}{RT} \right) \cdot [Na^+]_0 \cdot \exp \left[\frac{F(\varphi'_0 - \varphi_0)}{RT} \right] = K_{Na^+} [Na^+]_0 \exp \left[-\frac{FE_0}{RT} \right], \\ C_{Na_1^+} &= \exp \left(\frac{\mu'_{0Na^+} - \mu_{0Na^+}}{RT} \right) \cdot [Na^+]_1 \cdot \exp \left[\frac{F(\varphi'_0 - \varphi_0)}{RT} \right] = K_{Na^+} [Na^+]_1 \exp \left[\frac{FE_1}{RT} \right], \\ C_{Cl_0^-} &= \exp \left(\frac{\mu'_{0Cl^-} - \mu_{0Cl^-}}{RT} \right) \cdot [Cl^-]_0 \cdot \exp \left[\frac{F(\varphi'_0 - \varphi_0)}{RT} \right] = K_{Cl^-} [Cl^-]_0 \exp \left[\frac{FE_0}{RT} \right], \\ C_{Cl_1^-} &= \exp \left(\frac{\mu'_{0Cl^-} - \mu_{0Cl^-}}{RT} \right) \cdot [Cl^-]_1 \cdot \exp \left[\frac{F(\varphi'_0 - \varphi_0)}{RT} \right] = K_{Cl^-} [Cl^-]_1 \exp \left[-\frac{FE_1}{RT} \right] \end{aligned} \right\} \quad (5.43)$$

Подставляя значение (5.43) в уравнение (5.39) для разности потенциалов внутри мембраны $\varphi_1 - \varphi_0$ и вычисляя полный мембранный потенциал $\varphi_m = \varphi'_1 - \varphi'_0 = E_0 + \varphi_1 - \varphi_0 + E_1$ и используя тождество

$$E_0 + E_1 = \frac{RT}{F} \ln \left(\exp \frac{FE_0}{RT} \cdot \exp \frac{FE_1}{RT} \right) \quad (5.44)$$

Получим

$$\varphi_m = \frac{RT}{F} \ln \frac{U_{k^+} k_{k^+} [k^+]_0 + U_{Na^+} k_{Na^+} [Na^+]_0 + U_{ce^-} k_{ce^-} [ce^-]_0 \cdot \exp \left[\frac{F(E_0 - E_1)}{RT} \right]}{U_{k^+} k_{k^+} [k^+]_1 + U_{Na^+} k_{Na^+} [Na^+]_1 + U_{ce^-} k_{ce^-} [ce^-]_0 \cdot \exp \left[\frac{F(E_0 - E_1)}{RT} \right]} \quad (5.45)$$

Вводя коэффициенты проницаемости в виде

$$\left. \begin{aligned} P_{k^+} &= \frac{RTU_{k^+} k_{k^+}}{d}, \\ P_{Na^+} &= \frac{RTU_{Na^+} k_{Na^+}}{d}, \\ P_{cl^-} &= \frac{RTU_{cl^-} k_{cl^-}}{d}, \end{aligned} \right\} \quad (5.46)$$

тогда уравнение (5.45) преобразуется следующим образом

$$\varphi_m = \frac{RT}{F} \ln \frac{P_{k^+} [k^+]_0 + P_{Na^+} [Na^+]_0 + P_{ce^-} [ce^-]_0 \cdot \exp \left[\frac{F(E_0 - E_1)}{RT} \right]}{P_{k^+} [k^+]_1 + P_{Na^+} [Na^+]_1 + P_{ce^-} [ce^-]_0 \cdot \exp \left[\frac{F(E_0 - E_1)}{RT} \right]} \quad (5.47)$$

Поскольку проницаемость мембраны для ионов хлора близка к нулю, тогда будем иметь

$$\varphi_m = \frac{RT}{F} \ln \frac{P_{k^+} [k^+]_0 + P_{Na^+} [Na^+]_0}{P_{k^+} [k^+]_1 + P_{Na^+} [Na^+]_1} \quad (5.48)$$

Так как проницаемость для ионов K^+ гораздо выше, чем проницаемости Na^+ , тогда уравнение (5.48) превращается в уравнение Нернста:

$$\varphi_m = \frac{RT}{F} \ln \frac{k_0^+}{k_1^+} = \frac{RT}{eN_A} \ln \frac{k_0^+}{k_1^+}, \quad (5.49)$$

где e — заряд электрона, N_A — постоянная Авогадро, R — газовая постоянная, T — температура по шкале Кельвина, а K_0^+ и K_1^+ — концентрации ионов калия внутри и вне клетки соответственно. Подставляя в выражение (5.49) $\frac{K_0^+}{K_1^+} = 30$ и $T = 300$ К, $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл и $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$, получаем $\varphi_m = 86$ мВ $= 8,6 \cdot 10^{-2}$ В.

Следует отметить что падение напряжения на клеточной мембране, составляющее $8,6 \cdot 10^{-2}$ В $< 0,1$ В происходит на отрезке длиной около 10^{-6} см. Поэтому напряженность электрического поля в конце мембраны может достигать значений около $10^5 \frac{\text{В}}{\text{см}}$, которые близки к напряженности электрического пробоя этой мембраны: $(2-4) \cdot 10^5 \frac{\text{В}}{\text{см}}$.

КРАТКИЙ СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

- Аминокислота — химическое соединение воды $H_2N-CHR-COOH$, где R любой радикал является исходным продуктом для синтеза белка.
- Анемия — болезненное состояние, характеризующееся уменьшением количества эритроцитов и гемоглобина.
- Анемия гемолитическая — общее название анемии развивающейся вследствие повышенного распада эритроцитов.
- Антиген — чужеродный для организма белок, вызывающий в организме защитную реакцию иммунитета.
- Антитела — сложные белки — иммуноглобулины плазмы крови, синтезируемые клетками лимфоидной ткани под воздействием различных антигенов; взаимодействуют с микроорганизмами, препятствуют их размножению или нейтрализуют выделяемые ими токсические вещества.
- Атеросклероз — хроническое сердечно — сосудистое заболевание преимущественно людей пожилого возраста: характеризуется уплотнением артериальной стенки за счёт разрастания соединительной ткани, образованием так называемых атеросклеротических бляшек сужением просвета сосудов и ухудшением кровоснабжения органов.
- Белок — Важнейший компонент живой клетки. Представляет собой цепь, образующую сложную пространственную структуру. Природные белки — это гетерополимеры, состоящие из аминокислотных остатков, 20 сортов. Один белок отличается от другого последовательностью аминокислотных остатков.
- Валин — одна из 20 канонических аминокислот.
- Вирус — клеточный паразит, один из простейших объектов живой природы. В некоторых случаях вирус, оказавшись внутри клетки, не губит её, а встраивает свою ДНК в ДНК клетки, после чего вирусная ДНК начинает размножаться вместе с ДНК клетки. При этом, поведение самой клетки может резко измениться.
- Гармон — Молекулы как белковой так и иной природы, регулирующие многие процессы в организме. Широко известны такие гармоны как инсулин, гармон роста и др.
- Гемоглобин — белок, переносящий кислород в крови, обуславливает красный цвет крови.
- Гепатит — тяжелое вирусное заболевание печени

- Глобул — Участок полимерной цепи «Сконденсированного кулика», как плотная сконденсированная «капля» из полимера
- Глобулины — белок с большой ($1,5 \cdot 10^5 - 1,6 \cdot 10^5$) м массой
- Иммуноглобулин — белок, вырабатываемый иммунной системой в ответ на проникновение в организм чужеродного вещества.
- Инсулин — гормон животных и человека вырабатываемый поджелудочной железой понижает содержание сахара в крови.
- Инфаркт миокарда — сердечнососудистое заболевание характеризующееся образованием очага омертвения в сердечной мышце вследствие нарушения его кровоснабжения.
- Кислородный запрос — величина потребности организма в кислороде.
- Клубок — понятие физики полимеров. Служит для обозначения того, какую форму в пространстве имеет полимерная молекула. Из-за теплового движения форма полимерного клубка постоянно меняется.
- Лейкоциты — бесцветные клетки крови человека и животных.
- Липосомы — специальные пузырьки в которые заполняется лекарственный препарат.
- Липиды — жиры и жироподобные вещества.
- Миоглобин — белок, содержащийся в мышцах человека, выполняет функцию переносчика кислорода.
- Плазма крови — жидкая часть крови.
- Полипептиды — соединения, построение, подобно белкам из аминокислот, но их аминокислотные цепи на много короче, чем в белках.
- Термография — метод регистрации инфракрасного излучения поверхности тела человека
- Тромбоциты — клетки крови участвующие в свёртывании крови.
- Ферменты — биологические катализаторы белковой природы.
- Эритроциты — красные кровяные клетки крови; переносят кислород от легких к тканям и углекислый газ от тканей к легким.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волькенштейн М.В. Физика и биология, М.1980г.
2. Рубен А.Б. Биофизика М.1987 г.
3. Владимирова Ю.А., Рошупкин Д.И., Потапенко А.Я., Деев А.И. Биофизика М.1983 г.
4. Блановский А.С. Основы биофизики в ветеринарии М.1989 г.
5. Ремизов А.Н. Медицинская и биологическая физика. М 1987 г.
6. Гиллер Ю.Е., Егибеков П.Е., Рахмимудоев Т.Р. Биофизика. Методическая разработка по теоретическому курсу. Душанбе, 1990 г.
7. Ивков В.Т., Берестовский. Липидный бислой биологических мембран. М. 1982 г.
8. Котик А. Япачек К. Мембранный транспорт. М.1980 г.
9. Блюменфельд Л. А. Биофизика мембран. М.1981 г
10. Гросберг А. Ю., Хохлов А.Р. Физика в мире полимеров. М. 1989 г.
11. Чизмаджев Ю. А. Мембраны: ионные каналы. М. 1981г.
12. Агаджанян Н. А. Человек и биосфера. М. 1987 г.
13. Болдырев А. А. Строение и функция биологических мембран. М. 1987 г.
14. Королук И., Цыб А. Беседы о ядерной медицине. М. 1988 г.
15. Егибеков П. Е. Жидкие кристаллы и живая клетка. Душанбе, 2005 г.
16. Пиров Т.Т., Егибеков П.Е. Жидкие кристаллы и живой организм. Душанбе 2008 г.
17. Егибеков П.Е. Соддилов И.С. Жидкие кристаллы и тайны крови, Душанбе. 2011.
18. Горский Ф., Ахромов А., Бошун М. Анизотропия диамагнитной восприимчивости в гомологическом ряду эфиров холестерина и насыщенных карбоновых кислот. Сб. Жидкие кристаллы и их применение. Иванова 1980 г.
19. Цветков В.Н. Рюмцев Е.И. Коломиец И.П. Ковшик А.И. ДАН СССР, №4. 1973г.
20. Богданов К.Ю. Физик в гостях у биолога М. 1986 г.
21. Либерман Е. А. Живая клетка, М. 1986 г.
22. Бергельсон Л. Д. Мембраны, молекулы, клетки. М. 1982 г.
23. Михайлов В.Г. Тайны крови М.1982г.
24. Левтов В.А. Шадрин С.А. Биология крови. М. Медицина 1982. с. 272.
25. Егибеков П. Е., Егибеков М.П. Определение массы и плотности молекулы гемоглобина крови. Кишварз Душанбе 2010 с.42.

26. Пупкова В.И. Определение гемоглобина в крови «Вектор-ВЕСТ Кольцова, Душанбе 2001, с.1 из интернета 2008 г»
27. Материал из Википедии – свободной энциклопедии. Из материала интернета, 2008 г.
28. Кузин А.М. Невидимые лучи вокруг нас. М.1980г.
29. Савина Л.В. Кристаллооптические структуры сыворотки крови в клинике внутренних болезней. Авторф. Дисс. д-ра мед. наук. Перм. 1982 г.
30. Блуменфельд Л.А. Гемоглабин и обратимое присоединение кислорода М.1957.
31. International Committee for Standardization in Hematology I. Clin. Pathol. 1978 31;139.
32. Иржак Л.И. Состав и функция крови. // Соровский образовательный журнал. Биология. Т.7. 2001 г.
33. Антонов В.Ф. Биофизика мембран // Соровский образовательный журнал. Биология Т.7. 2011.
34. Лейтфут Э. Явлений переноса в живых системах. М. Мир. 1977.
35. Медведь А.Е. Самсонов И. В. Фомин В.М. Математический моделирование течение крови в сосудах. В: Система кровообращения и артериальная гипертензия; биофизические и генетико – физиологические механизмы, математические и компьютерное моделирование. Новосибирск. Из – во СО – РАН. 2008.
36. Naiz P.K. Simulation of oxygen transport in capillary. Ph. D. Thesis. Rice University, 1988y.
37. Pries A.R. Kanzow G. Gaehtgens P. Micro photometric determination of hematocrit in small vessels. Am. J. Physiol. 1983.
38. Гаврилчак И.Н., Игнатов В.В., Кидалов В.Н., Рымкевич П.П., Слоев В.Н., Хадарцев А.А. О формирование эритроцитов в потоке крови. Вестник новых медицинских технологий. Т. XIII, №1. 2006.
39. Игнатов В.В., Кидалов В.Н., Рымкевич П.П., Сомоилов В.О. Массоперенос компонентов плазмы крови через плазмалемму, эритроцитов в поле центробежных сил. Российский физиологический журнал. Им. И.М. Сеченова. Т. 82. №5 – 6, 1996.
40. Атаулаханов Ф.И., Корупова Н.О., Спиридонов И.С., Пивоваров И.О., Коляшина Н.В., Мартинов М.В. Как регулируется объем эритроцита, или что могут и чего не могут математические модели в биологии. Биологические мембраны. Т. 26, № 3. 2009.
41. Кизилова Н.Н. Биофизика сложных систем. Агрегация и оседания эритроцитов в магнитном поле. Биофизика. Т. 38. Вып. 3. 1993.
42. Иванова С.М., Магнитное поле в теории и практике медицины. Куибешиев 1984.

43. Русяев В. Ф., Проблемы гематологии и переливание крови. 1979. №2
44. Антонов В. Ф. Мембранный транспорт. Московская медицинская академия имени И.М. Сеченова. 1997.
45. Игнатов В.К., Никитин А. В., Хромов С.В., Анализатор стойкости эритроцитов. Радиофизика. Вестник ВолГУ. Серия 1. Вып. 13. 2010.
46. Инна Степанова. Кровавые преступления. 9 июль 2011 (из Интернета).
47. Кровь. Рефераты и Дипломные работы. 2011 (из Интернета).
48. Ноздриухина Л. Р. Медь и железа — металлы жизни. М. Наука. 1986.
49. Розенгард И.В. Ферменты — двигатели жизни. Л. Наука. 1983.
50. Rabinson C. Liquid Crystalline Structure in Solution of the Polypeptide. Part I. Trans. Faraday Soc. 52. 1956.
51. Rabinson C. Liquid Crystalline Structure in Solution of a Polypeptide. Part II. Discuss. Faraday Soc. 52. 1958.
52. International Committee for Standartion in Hoematology I. Clin. Pathol. 1978 31;139.
53. Ахрен А. А., Андюк Г. М., Кисель М. А., Киселева С. И. Докл. АН.СССР. Т.20 №4 1986.
54. Авдева Н. А.// Лаб. Дело № 10. 1987.
55. Ltvitt M. C. Chothia. «Structural paterns in globular proteins». Nature. June 17. 1976.
56. Левтов В. А., Регирер С. А., Шадрина Н. Х., Реология крови. М. Медицина. 1982.
57. Пупкова В. И., Жданова В. В. // Новости « Вектор — бест », № 1. 2000.
58. Медведев А. Е. Двухфазная модель течения крови в крупных и мелких кровосных сосудах. Математическая биология и био информатика. Т. 6. № 2. URL. 2011.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Глава 1. Течение крови — река жизни.....	7
1.1. Эритроциты крови	8
1.2. О регуляции объема Эритроцита	13
1.3. Лейкоциты	14
1.4. Тромбоциты и свертывание крови.....	16
1.5. Плазма крови	18
 Глава 2. Гемоглобин крови	 21
2.1 Гемоглобинная буферная система	24
2.2 Определение масса и плотности гемоглобина крови	26
2.3. Последствия железо-дефицита в гемоглобине крови.....	29
2.4. О прочности структуры биополимера гемоглобина крови.....	30
2.5. Воздействие магнитного поля на молекулы гемоглобина крови	32
 Глава 3. Физические закономерности движения крови	 40
3.1. Скорость падения форменных элементов крови в поле тяготения Земли	43
 Глава 4. О времени жизни форменных элементов крови в человеческом организме.....	 45
 Глава 5. Основы физики мембраны клетки крови	 49
5.1. Компоненты мембраны клетки	49
а. Белки	50
б. Липиды	54
в. Углеводы.....	60
5.2. Перенос вещества через биомембран клетки.....	61
5.3. Электродиффузионный перенос ионов через биологические мембраны.....	65
Краткий словарь терминов.....	74
Литература	76

Егибеков П.Е. Шоайдаров Н.Б.

БИОФИЗИКА КРОВИ

Художественный редактор Р.Шерали
Технический редактор М.Саидова

Сдано в производство 17.10.2012.

Подписано к печати 21.10.2012.

5,0 печ.л. Формат 60x84 1/16. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии ЧДММ «Шахпар»
г. Душанбе, проспект «Дусти халкхо», 47.