



ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ МИТОХОНДРИЙ В УСЛОВИЯХ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ И РИСКИ ЗАБОЛЕВАНИЯ ГЛАЗ

В.А. Капцов¹, В.Н. Дейнего², В.Н. Уласюк³

¹Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожной гигиены, Россия, 125438, г. Москва, Пакгаузное шоссе, 1, корп. 1

²ООО «Биолюмен», Россия, 141195, г. Фрязино, проспект Мира, 8

³АО «Научно-исследовательский институт "Платан" с заводом при НИИ», Россия, 141190, г. Фрязино, Заводской проезд, 2

Из-за нарушения рефракции, миопии и других изменений зрения снижается продуктивность любого рода деятельности, ограничиваются образовательные и трудовые возможности экономически активного населения. С увеличением степени денатурации света нарастает степень утомления от выполнения тестовой зрительной работы. Наименьший спад физиологических и психологических показателей у человека отмечается при работе в условиях естественного освещения, наибольший – при полностью искусственном освещении. Искусственные источники света по отношению к равномерному спектру солнечного света имеют выбросы и провалы фотонного потока при определенных длинах волн.

Показано, что в области красного света 670 нм имеет место резкий спад спектрально-энергетической характеристики по сравнению со спектром солнечного света. Рассмотрено как дефицит красного света 670 нм влияет на функционирование клеток зрительного анализатора в целом и на митохондрии в частности. В теории старения митохондрий утверждается, что окислительный стресс, вызванный мутациями ДНК митохондрий, ассоциируется с уменьшением производства аденозинтрифосфата (АТФ), приводящим к клеточной дегенерации. Скорость этой деградации связана с метаболическим спросом организма, прогрессирующим воспалением внешней сетчатки, вторжением макрофагов и потерей клеток, в результате чего снижается зрение. В рамках причинно-следственной цепи «свет 670 нм – структурные свойства воды – эффективность работы роторного двигателя митохондрии» рассмотрен механизм снижения эффективности структур, синтезирующих АТФ. Обоснована необходимость синтеза красного люминофора 670 нм и оптимизации светодиодного освещения в этой части спектра.

Ключевые слова: красный свет 670 нм, структура воды, эффективность синтеза АТФ, энергетический потенциал митохондрии, светодиодное освещение.

Влияние света на циркадные ритмы человека и эффективность работы его зрительного анализатора является глобальной проблемой при оценке рисков здоровью. Основатель гигиены Ф.Ф. Эрисман в своих исследованиях подчеркивал связь между световой средой и развитием миопии [1], которая в настоящее время приобретает форму мировой эпидемии [2–4].

В то же время Ф.Ф. Эрисман указывал следующее: «Близорукость не есть неизбежное зло, которое необходимо сопряжено со школьным воспитанием; напротив, прогрессивная миопия есть зло, возникающее только от нецелесообразного устройства школ, и это зло было бы, конечно, устранено, если бы на устройство школ было бы обращено внимание общества» [5].

В рамках XII Всероссийского форума «Здоровье нации – основа процветания России» ведущие

российские и зарубежные офтальмологи обсудили международный опыт по контролю миопии [6]. Форум открывали его сопредседатели: министр здравоохранения РФ В.И. Скворцова и президент Лиги здоровья нации, академик РАН Л.А. Бокерия. В докладе Т.В. Павловой – доцента кафедры офтальмологии педиатрического факультета Российского национального исследовательского медицинского университета имени Н.И. Пирогова – на тему «Проблемы и достижения в области контроля миопии. Роль общественной организации в консолидации усилий в борьбе с миопией» отмечалось, что из-за нарушения рефракции, миопии и других нарушений зрения снижается продуктивность любого рода деятельности, ограничиваются образовательные и трудовые возможности экономически активного населения. Президент Акционерной компании Asia

© Капцов В.А., Дейнего В.Н., Уласюк В.Н., 2019

Капцов Валерий Александрович – доктор медицинских наук, член-корреспондент РАН, заведующий отделом гигиены труда (e-mail: karsovva39@mail.ru; тел.: 8 (499) 153-36-28; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3130-2592>).

Дейнего Виталий Николаевич – старший научный сотрудник (e-mail: vn-led@bk.ru; тел.: 8 (916) 530-68-82).

Уласюк Владимир Николаевич – доктор физико-математических наук, главный научный консультант (e-mail: v_n_uls@mail.ru; тел.: 8 (495) 702-96-58; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1130-710X>).

Networks (Япония) Шимидзу Тадаши отметил, что главной причиной широкого распространения миопии в Японии является массовое использование смартфонов, планшетов и других современных технических устройств. В результате, по оценкам экспертов, ежегодные потери продуктивности глобальной экономики составляют 269 млрд долларов [7].

Великий ученый С.И. Вавилов в своей книге «Глаз и Солнце» приводит высказывание философа и естествоиспытателя И.В. Гете: «Глаз обязан бытием своим свету. Из безучастных животных вспомогательных органов свет вызывает орган, который стал бы ему подобным; так образуется глаз на свету, для света, чтобы внутренний свет встречал внешний». Сергей Вавилов отмечал, что с биологической точки зрения «оптимальная освещенность» должна быть результатом эволюционного приспособления глаза к средней освещенности, создаваемой на Земле Солнцем. Глаз в отношении энергии приспособлен не к самому Солнцу, а к солнечному свету, рассеянному от окружающих тел.

Начиная с 2017 г. для решения глобальных проблем светотехнической направленности создан Научно-технический совет светотехнической отрасли «НТС «Светотехника»», который объединил общественных и государственных деятелей, представителей органов власти, Государственной Думы РФ, Совета Федерации, ученых-светотехников: академиков, профессоров, докторов наук, а также социально ответственных представителей крупного бизнеса и ведущих специалистов отрасли. В очередном заседании «НТС «Светотехника»» принял участие депутат Государственной Думы, первый заместитель председателя комитета Государственной Думы по образованию и науке Г.Г. Онищенко, который отметил: «Несмотря на пугающую техничность этого заседания, сегодня присутствуют такие доклады, как “Особенности воздействия светодиодных источников на орган зрения детей, подростков и взрослых (И.Э. Азнаурян)”, что говорит о том, что НТС находится на правильном пути». Сегодня общественные организации и ассоциации пытаются взять на себя ответственность за последствия негативного влияния искусственного света, который они продвигают на светотехническом рынке.

При этом следует отметить, что начиная с 70-х гг. прошлого столетия на государственном уровне оценка биологического действия естественного и искусственного освещения осуществлялась специалистами лаборатории гигиены освещения (лаборатории лучистой энергии) Института общей и коммунальной гигиены им. А.Н. Сысина, который в настоящее время переименован в «Центр стратегического планирования и управления медико-биологическими рисками здоровью». В этих исследованиях [8] сотрудниками лаборатории гигиены света проводился анализ зависимости степени утомления наблюдателей, которая определялась функционалом $F[f_i, E]$, в зависимости от условий общего освещения $[E]$, рас-

считываемого по динамике каждой из исследованных функций $f_i[E]$. Было показано, как с нарастанием степени денатурации света, то есть снижения доли естественного света в комплексном световом потоке, возрастала степень утомления от выполнения тестовой зрительной работы. Наименьший спад физиологических и психологических показателей состояния испытуемых отмечался при работе в условиях естественного освещения, наибольший – при полностью искусственном освещении. На рис. 1 приведена зависимость показателя утомления от соотношения естественного и искусственного света при освещении люминесцентными лампами типа ЛБ (световой поток 2800–3000 лм и 3450 К – 4200 К при управлении уровнем освещенности на рабочей поверхности).

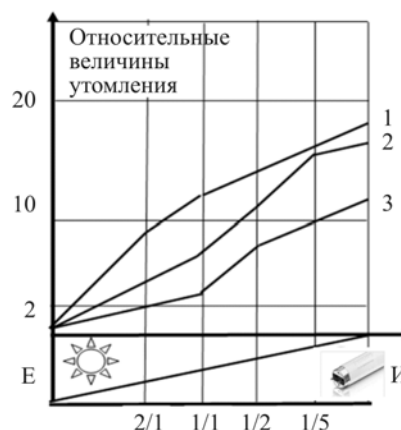


Рис. 1. Зависимость утомления от соотношения естественного и искусственного света [8]: при освещенности 300 лк – 1, 500 лк – 2, 1000 лк – 3; Е – естественный свет, I – искусственный свет

В ходе проведенных исследований специалистами института им. А.Н. Сысина были определены уровни гигиенического минимума естественного света для рабочих помещений общественных зданий, что и было положено в основу гигиенических требований к совмещенному освещению, как 250–300 лк естественного света, η .

При внедрении люминесцентного освещения сотрудники НИИ строительной физики Госстроя СССР также отмечали, что при естественном свете зрительная работоспособность была выше, чем при искусственном. Для сравнения брались люминесцентные лампы типа ЛБ 40. Численные значения показателя зрительной работоспособности определялись как произведение времени различения на вероятность правильного опознавания (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что гигиенически минимальному уровню естественного света 250–300 лк при заданном уровне работоспособности соответствует минимальный уровень люминесцентного освещения 400–500 лк соответственно. Приближая спектр света энергосберегающего искусственного источника излучения к спектру солнечного света, можно не только

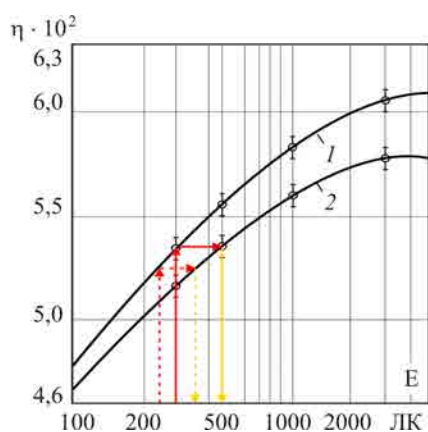


Рис. 2. Зависимость зрительной работоспособности от освещенности при естественном – (1) и искусственном – (2) освещении [9]

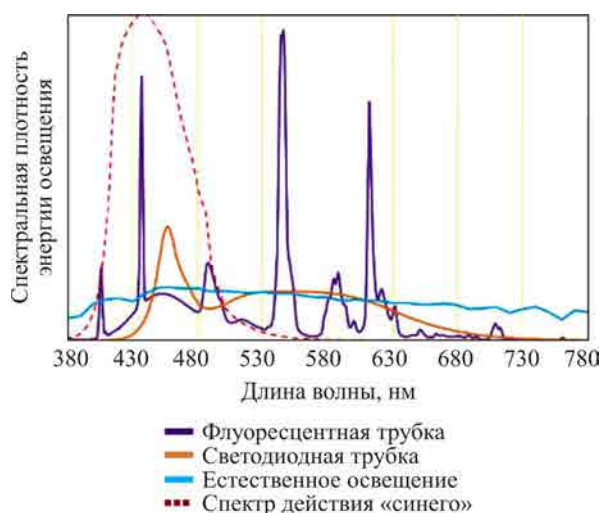


Рис. 3. Сравнение спектров люминесцентных и светодиодных ламп со спектром солнечного света



Рис. 4. Кривая закона оптимума или закона В. Шелфорда

экономить электроэнергию, но и обеспечить совместимость работы этих источников освещения, формируя безопасную световую среду с биологически адекватным спектром излучения.

По результатам проведенных исследований сотрудники института им. А.Н. Сысина З.А. Скобарева и Л.М. Текшева сделали следующие выводы:

1. Излучение биологического действия света на человека остается актуальной проблемой гигиены освещения.

2. Экспериментально на клеточном, биологическом и психофизиологическом уровнях доказана биологическая неадекватность естественного и искусственного света равной интенсивности, которая сохраняется и при повышении уровня освещенности от искусственных источников света.

3. Большое гигиеническое значение естественного света должно учитываться при разработке норм освещения и новых технических средств оптимизации световой среды в помещениях с длительным пребыванием людей [8].

При этом важно отметить, что специалисты института не проводили спектральную оценку неадекватности между естественным и искусственным светом.

На рис. 3 для сравнения приведены спектры люминесцентных ламп, светодиодных ламп и солнечного света.

Искусственные источники света по отношению к равномерному спектру солнечного света имеют выбросы и провалы фотонного потока при определенных длинах волн – выбросы в области синего света, провалы – в области 480 нм, красного света – в области 670 нм.

Массовое внедрение светодиодного освещения, в спектре которого доза синего света значительно больше, чем у люминесцентных ламп, породило исследования по оценке рисков здоровью человека и зрительному анализатору от «синей опасности».

При этом офтальмологи и специалисты светотехники не обращали внимания, что в спектре современных белых светодиодов уровень красного света 670 нм был ниже, чем в спектре солнечного света. Такая недооценка значимости роли красного света обусловлена тем, что этот диапазон излучения лежит за пределами кривой спектральной чувствительности глаза (кривой видности глаза человека). При этом специалисты по фотобиологической безопасности в своей работе руководствовались максимальными значениями световых потоков на определенных длинах волн и считали, что их минимальные значения не могут нанести существенного вреда глазу. Такая концепция была обусловлена оценкой безопасности зрительного анализатора от воздействия лазерных источников света. Но гигиенисты и светотерапевты знают, что избыток светового потока, как и его недостаток, губительно сказываются на жизнестойкости клеток живых биообъектов.

Гигиенисты оценивают риски от уровня воздействия по критериям закона оптимума, или закона В. Шелфорда (рис. 4).

Из этого закона следует, что есть оптимальные значения воздействующего фактора, при котором обеспечивается нормальная жизнедеятельность клетки, зоны пессимума и гибели. Этот гигиенический подход получил развитие при применении методов лазерной терапии. Низкий уровень лазерной

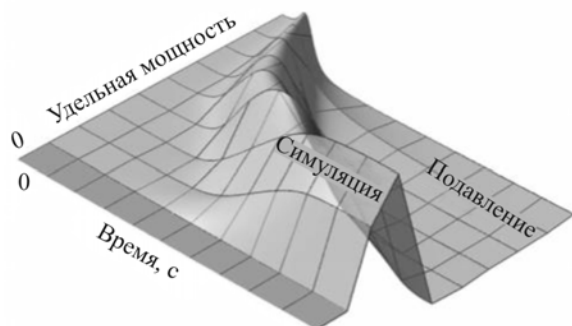


Рис. 5. Трехмерная модель кривой Арндт – Шульца, иллюстрирующая, как излучение или время освещения могут иметь двухфазную реакцию дозы при низком уровне лазерной (легкой) терапии [10]

(легкой) терапии (НУЛТ), при котором использовали видимый, как правило красный, или почти инфракрасный свет, генерируемый лазером или светодиодом (LED), для лечения различных патологий у людей и животных, был известен с 1967 г. Этот свет обычно имеет узкую спектральную ширину между 600 и 1000 нм. При выборе уровня воздействия применяется трехмерная модель кривой Арндт – Шульца (рис. 5).

Согласно квантовой теории света, каждой длине волны электромагнитных колебаний соответствует свой энергетический поток фотонов, который порождает свой поток фотохимических реакций. Ф.Х.Гротгус в России (1817) и Дрейпер в США (1839) независимо друг от друга сформулировали закон, согласно которому химически активны лишь те лучи, которые поглощаются реакционной смесью. Основной закон фотобиологии заключается в том, что биологический эффект вызывают части спектра только такой длины волны, при которой они поглощаются молекулами клеток. Наличие фотобиологического эффекта однозначно указывает на присутствие в клетках молекул, поглощающих кванты света данной области спектра [11]. Зависимость погло-

щающей способности вещества от длины волны света определяется спектром поглощения.

Поглощение света веществом – внутримолекулярный физический процесс. Свет поглощается молекулами (их комплексами, атомами, радикалами, ионами), а не сложными биологическими структурами, такими как ядра, митохондрии, клетки, сетчатка глаза. Исключение составляют лишь полупроводники, у которых в поглощении света участвуют обобществленные энергетические уровни, создающиеся в результате взаимодействия многих центров (атомов, ионов или молекул). Во взаимодействии вещества со светом, связанным с поглощением, проявляются как квантовые (корпускулярные), так и волновые свойства последнего [12].

Спектры современных светодиодов (синий кристалл, покрытый желтым люминофором) основаны на вышеуказанных закономерностях (рис. 6).

Ранее мы рассматривали роль негативного влияния выбросов синего света на сетчатку и гормональную систему человека, а также роль провала в области голубого света 480 нм на динамику управления зрачком [14–17].

В настоящей статье мы анализируем, как снижение дозы красного света 670 нм влияет на жизнеспособность митохондрий клеток. Митохондрии являются основными продуцентами свободных радикалов в эукариотических клетках. Свободные радикалы, такие как супероксид-радикал или гидроксид-радикал, в норме образуются в митохондриях в ходе работы дыхательной цепи, обеспечивающей синтез аденозинтрифосфата (синтез АТФ) – основной энергетической «валюты» клетки. Митохондрии также в большей степени подвержены повреждению свободными радикалами: митохондриальная ДНК, в отличие от ядерной, не защищена гистонами или другими ДНК-связывающими белками. И, поскольку митохондрии являются важными клеточными органеллами, нарушение их работы может приводить к таким последствиям, как, например, апоптоз – программируемая клеточная смерть.

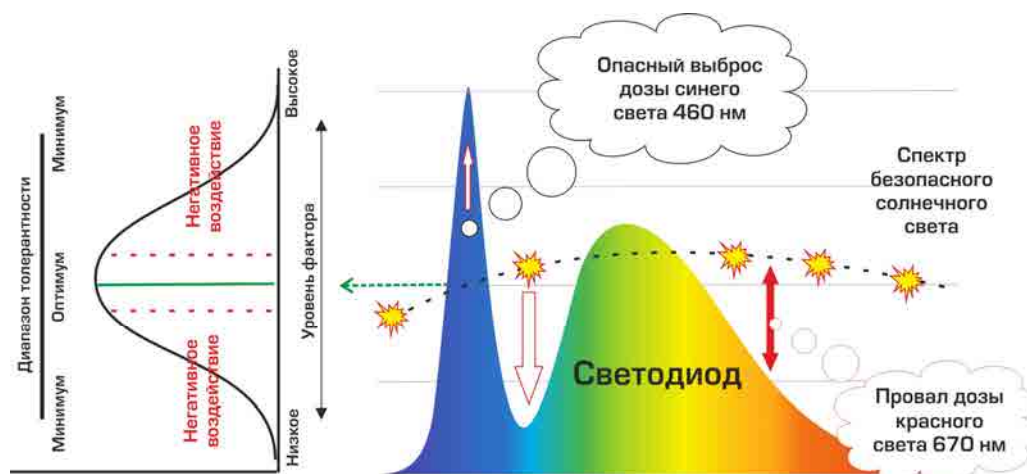


Рис. 6. Спектральные характеристики солнечного света и традиционного светодиода (синий кристалл, покрытый желтым люминофором) [13]

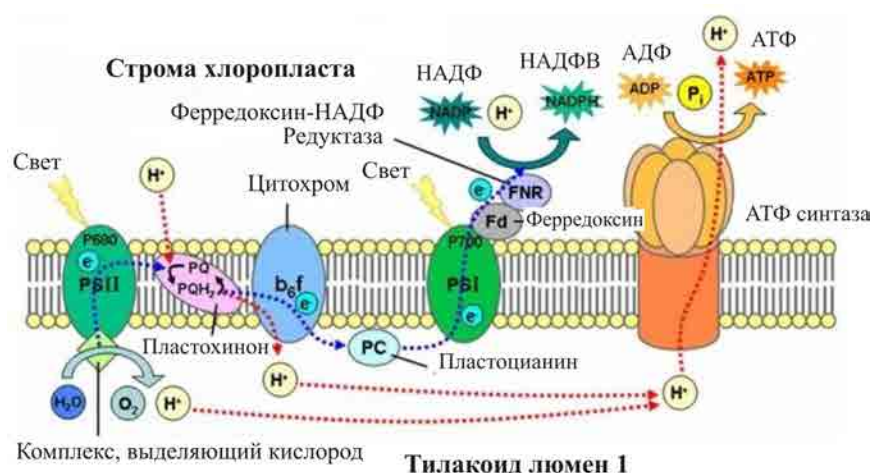


Рис. 7. Фотосинтетическая транспортная цепь электронов тилакоидной мембраны [19]

В монографии Г. Линга «Life at the cell and below-cell level, the hidden history of fundamental revolution in biology» объяснено, что клетка – не водный раствор в липидной оболочке, а белково-водно-электролитная структура, которая удерживается за счет многослойной организации поляризованной воды вокруг полноразвернутых белковых структур. При этом теория Линга на практике подтверждается, а теория липидных мембран противоречит данным наблюдениям, поскольку клетка абсорбирует больше воды, чем может объяснить мембранная теория. Теория ассоциации – индукции заключается в стремлении автора перенести «центр тяжести» в понимании жизненных функций клетки с клеточной мембраны на цитоплазму при рассмотрении изменения электронной плотности в макромолекулах, вызываемого внешними сигналами, как основной механизм регуляции клеточных функций. Эти представления опираются на тесную взаимосвязь в цитоплазме клетки трех основных «игроков» – белков, структурированной воды и неорганических ионов [18], к которым относятся ионы водорода, натрия, железа, меди и цинка.

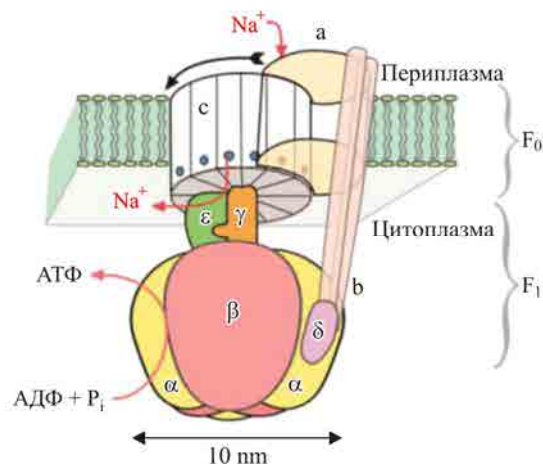
В настоящее время имеется большое число исследований по функционированию митохондрии, и предлагаются механохимические модели выработки ее структурами АТФ. Наибольшим признанием пользуется хемиосмотическая теория английского биохимика П. Митчелла (1961). Он высказал предположение, что поток электронов через систему молекул-переносчиков сопровождается транспортом ионов H^+ через внутреннюю мембрану митохондрий. В результате на мембране создается электрохимический потенциал ионов H^+ , включающий химический, или осмотический, и электрический градиенты (мембранный потенциал). Согласно хемиосмотической теории, электрохимический трансмембранный потенциал ионов H^+ и является источником энергии для синтеза АТФ за счет обращения транспорта ионов H^+ через протонный канал мембранной H^+ – аденозинтрифосфатсинтазы (АТФ).

Теория Митчелла исходит из того, что переносчики перешнуровывают мембрану, чередуясь таким образом, что в одну сторону возможен перенос и электронов, и протонов, а в обратную – только электронов. В результате ионы H^+ накапливаются на одной стороне мембраны.

Между двумя сторонами внутренней митохондриальной мембраны в результате направленного движения протонов против концентрационного градиента возникает электрохимический потенциал. Энергия, запасенная таким образом, используется для синтеза АТФ как результат разрядки мембраны при обратном (по концентрационному градиенту) транспорте протонов через АТФ, которая работает в этом случае как АТФ-синтаза (рис. 7).

В работе P. Dimroth et al. [20] представлена механохимическая модель для индукции трансмембранной натриеводвижущей силы во вращающийся крутящий момент (рис. 8).

Тот же механизм, вероятно, будет работать в других F-АТФ-синтазах, включая протонную H^+ -АТФ-синтазу [21]. В основе приведенных механохимических моделей получения АТФ лежит работа


 Рис. 8. Принципиальная схема АТФ-синтазы Na^+ FoF1 стрелка указывает направление вращения при синтезе АТФ

нано электродвигателя от потока ионов водорода H^+ или натрия Na^+ , который имеет ротор и статор, то есть митохондриальный ротационный двигатель, называемый АТФ-синтазой.

В работе P. Dimroth et al. [20] также отмечается, что из-за электростатического взаимодействия между участками ротора и заряда статора переходы между состояниями зависят от углового положения ротора, обозначенного θ . Эволюция химического состояния ротора символически описывается уравнением

$$\frac{ds}{dt} = K(\theta)s,$$

где $K[\theta]$ – матрица скоростей перехода между химическими состояниями. Движение ротора можно описать, приравняв вязкое сопротивление ротора к вращающим моментам, действующим на ротор, к броуновской силе, моделирующей тепловые флуктуации ротора (то есть уравнение Ланжевена [22, 23]):

$$\underbrace{\zeta \frac{d\theta}{dt}}_{\text{Фрикционное сопротивление}} = \underbrace{\tau_Q(\theta, s)}_{\text{Ротор – статор заряда взаимодействия}} + \underbrace{\tau_{\Delta\psi}(\theta, s)}_{\text{Мембраны потенциальны}} + \underbrace{\tau_{\Delta\epsilon}(\theta, s)}_{\text{Диэлектрический барьер}} +$$

$$\underbrace{\tau_{RS}(\theta)}_{\text{Пассивное взаимодействие ротор – статор}} - \underbrace{\tau_L(\theta)}_{\text{Крутящий момент нагрузки } F_1} + \underbrace{\tau_B(t)}_{\text{Броуновский крутящий момент}},$$

Слагаемые в правой части второго уравнения являются следующими:

♦ $[i] \tau_Q[\theta, s]$ обусловлено электростатическим взаимодействием между зарядом статора (R227) и узлами ротора, которые находятся внутри гидрофильной полосы ротора – статора. Заряженный (незанятый) участок, согласно закону Кулона, будет зависеть от заряда статора (R227), соответствующего диэлектрической и экранирующей среде статора. Гидрофильность – характеристика интенсивности молекулярного взаимодействия вещества с водой, способности хорошо впитывать воду, а также высокой смачиваемости поверхностей. Наряду с гидрофобностью она относится как к твердым телам, у которых является свойством поверхности, так и к отдельным молекулам, их группам, атомам, ионам;

♦ $[ii] \tau_{\Delta\psi}[\theta, s]$ обусловлено падением мембранного потенциала через горизонтальный сегмент между периплазматическим каналом и границей статора;

♦ $[iii] \tau_{\Delta\epsilon}[\theta, s]$ представляет собой электростатический барьер, который препятствует проникновению заряженного участка в гидрофобный интерфейс ротора – статора;

♦ $[iv] \tau_{RS}[\theta]$ является пассивным взаимодействием ротора со статором;

♦ $[v] \tau_L[\theta]$ представляет собой нагрузку, оказываемую F_1 на ротор через γ -вал;

♦ $[vi] \tau_B[t]$ является случайным броуновским моментом из-за тепловых флуктуаций ротора.

Предыдущие работы предполагали, что АТФ-синтаза (наименьший известный роторный двигатель) работает с эффективностью 100 % – картина, основанная на нескольких идеализированных предположениях, в том числе о том, что вязкость среды, окружающей двигатель, – это объемная вода [24], в то время как градиенты вязкости вблизи поверхностей не учитывались [10]. Игнорирование этой точки зрения имеет решающее значение, поскольку механическое поведение молекулярных машин отличается от такового их макроскопических аналогов, которые не применимы на молекулярном уровне. Это касается, в частности, применения концепции вязкого трения и смазки. Недавняя экспериментальная работа показала, что важно различать физические свойства объемной воды и уровни наноскопических межфазных слоев воды, которые являются маскирующими поверхностями. Наноскопические водные слои, связанные с гидрофильными поверхностями, характеризуются значениями вязкости, которые на порядки больше, чем объемная вода. Кроме того, было экспериментально показано, что с увеличением удержания между гидрофильными поверхностями вязкость наноскопических слоев воды резко возростала [24].

Из предложенной модели нагрузки мотора АТФ-синтазы [20] видно, что его скорость вращения, а значит и производительность по выработке АТФ, зависит от состояния воды. Проводимые расчеты по моделированию мотора АТФ-синтазы предполагали, что вязкость воды внутри митохондрий постоянна и соответствует вязкости воды. По мнению A.P. Sommer et al. [25], это предположение не является удовлетворительным по двум причинам:

1) имеются данные о том, что вода в митохондриях преобладает на 100 % в качестве межфазной воды;

2) лабораторные эксперименты, изучающие свойства межфазной воды, предполагают вязкость, превышающую вязкость объемной воды, особенно при гидрофильных границах.

В работе A.P. Sommer et al. [25] рассмотрен физико-химический механизм, который предполагает градиенты вязкости внутри митохондриальных вод и последовательно объясняет два клеточных ответа: уменьшение и увеличение синтеза АТФ в ответ на реактивные виды кислорода и неразрушающие уровни ближнего инфракрасного (NIR) лазерного излучения соответственно. Механизм основан на результатах нового экспериментального метода, который сочетает в себе метод наноидентифицирования с модуляцией межфазных слоев воды лазерным облучением. Ожидается, что результаты, включая выяснение принципа светоиндуцированного производства АТФ, будут иметь широкие последствия во всех областях медицины и, в частности, офтальмологии при анализе деградиационных процессов старения сетчатки.

Старение связано с клеточным снижением и сниженной функцией, частично опосредуемой

митохондриальным компромиссом. Однако возрастная функция митохондрий корректируется при инфракрасном свете (670 нм), что улучшает их мембранный потенциал и продукцию аденозинтрифосфата, а также уменьшает возрастное воспаление. Данные свидетельствуют о том, что свет 670 нм может значительно улучшить застарелую функцию сетчатки, возможно, обеспечивая дополнительное производство аденозинтрифосфата для ионных насосов фоторецепторов или уменьшения возрастного воспаления. Это может иметь последствия для лечения старения сетчатки и связанных с возрастом таких заболеваний, как дегенерация желтого пятна [26].

В резолюции 3th Global Pediatric Congress отмечались значительные достижения последних лет в детской офтальмологии, но обращалось внимание на нерешенные проблемы [27, 28]. Так, общая тенденция безопасного освещения полупроводниковыми источниками света и видео безопасного излучения дисплеев такова: необходимо иметь биологически адекватный спектр, который обеспечит гармоничную работу зрительного анализатора и гормональной системы человека. Конгресс обращает внимание глав стран и правительств на необходимость финансирования государственных программ по разработке национальных регламентов зрительной работы с привлечением к этим исследованиям офтальмологов

и представителей других научных дисциплин, специалистов в области гигиены и охраны труда.

В своем протоколе № 02/ТП от 19 июля 2017 г.¹ эксперты рабочей группы по безопасной эксплуатации зданий и сооружений также рекомендовали «при разработке нормативно-технической документации учитывать отечественный и мировой опыт создания полупроводниковых источников белого света с биологически адекватным спектром излучения» [29].

Выводы:

1. Все спектры энергосберегающих искусственных источников света имеют провал в области 670 нм, что негативно сказывается на синтезе АТФ в митохондриях клеток глаза.

2. Наличие в спектре света гигиенически оптимальной дозы красного света 670 нм положительно влияет на вязкость нанослоев воды и процесс синтеза АТФ.

3. Необходимо продолжить исследования по определению влияния гигиенически оптимальной дозы красного света 670 нм на изменения вязкости нанослоев воды и связанных с ними процессов синтеза АТФ.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы данной статьи сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Эрисман Ф.Ф. Избранные произведения. – М.: Медгиз, 1959. – Т. 1. – 390 с.
2. Prevalence of myopia and its association with body stature and educational level in 19-year-old male conscripts in Seoul, South Korea / S.-K. Jung, J.H. Lee, H. Kakizaki, D. Jee // *Invest Ophthalmol Vis Sci.* – 2012. – Vol. 53, № 9. – P. 5579–5583. DOI: 10.1167/iovs.12-10106
3. Капцов А., Дейнего В.Н. Фотобиологическая безопасность и техническая политика на светодиодном рынке // *Энергосовет.* – 2016. – Т. 46, № 4. – С. 42–46.
4. К вопросу о школьной близорукости / Е.Ю. Маркова, Н.А. Пронько, Л.В. Аминуллы, Л.В. Венедиктова, Л.Ю. Безмельницына // *Офтальмология.* – 2018. – Т. 15, № 1. – С. 87–91. DOI: 10.18008/1816-5095-2018-1-87-9
5. Медведев А.В. Гигиенические методы профилактики возникновения и прогрессирования школьной близорукости // *Здоровье и образование в XXI веке.* – 2013. – Т. 15, № 1–4. – С. 309–311.
7. Конференция «Миопию под контроль. Российский и зарубежный опыт»: основные выводы: пресс-релиз [Электронный ресурс] // *Вести. Медицина: сетевое издание.* – 2018. – URL: <https://med.vesti.ru/press-relizy/konferentsiya-miopiya-pod-kontrol-rossijskij-i-zarubezhnyj-opyt-osnovnye-vyvody/> (дата обращения: 29.06.2018).
8. Скобарева З.А., Текшева Л.М. Биологические аспекты гигиенической оценки естественного и искусственного освещения // *Светотехника.* – 2003. – № 4. – С. 7–13.
9. Гончаров Н.П., Киреев Н.Н. Зрительная работоспособность при естественном и искусственном освещении // *Светотехника.* – 1977. – № 9. – С. 5–7.
10. Biphasic dose response in low level light therapy – an update / H. Ying-Ying, S.K. Sharma, J. Carroll, M.R. Hamblin [Электронный ресурс] // *Dose-Response: An International Journal.* – 2011. – Vol. 9, № 4. – P. 602–618. – URL: http://scholarworks.umass.edu/dose_response/vol9/iss4/11. DOI: 10.2203/dose-response.11-009
11. Конев С.В., Волотовский И.Д. Фотобиология. – Минск: Издательство БГУ, 1979. – 384 с.
12. Агроскин Л.С., Папаян Г.В. Цитофотометрия. Аппаратура и методы анализа клеток по светопоглощению. – Л.: Наука, 1977. – 273 с.
13. Kaptsov V.A., Deinego V.N. Analytical review: Light-biological safety and risks of eye diseases among school child in classrooms with led light sources? Proceedings of 3rd Global Pediatric Ophthalmology Congress 2018 // *Journal of Clinical & Experimental Ophthalmol.* – 2018. – Vol. 9. – P. 58–59.
14. Капцов В.А., Дейнего В.Н. Иммунная система и искусственная световая среда // *Аллергология и иммунология.* – 2015. – Т. 16, № 3. – С. 253–258.

¹Протокол № 02/ТП от 19 июля 2017 г. рабочей группы по безопасной эксплуатации зданий и сооружений. Секция «Ресурсоэнергоэффективность, безопасность и экология» Технической платформы «Строительство и архитектура» (ТПСА).

15. Дейнего В.Н., Капцов В.А., Сорока А.И. Влияние света и физических полей на риск дисгармонизации синтеза мелатонина в шишковидной железе // Анализ риска здоровью. – 2014. – № 2. – С. 30–41. DOI: 10.21668/health.risk/2014.2.04
16. Дейнего В.Н., Капцов В.А. Гигиена зрения при светодиодном освещении. Современные научные представления // Гигиена и санитария. – 2014. – Т. 93, № 5. – С. 54–58.
17. Капцов В.А., Дейнего В.Н. Нарушение меланопсинового эффекта сужения зрачка – фактор риска заболевания глаз // Анализ риска здоровью. – 2017. – № 1. – С. 132–148. DOI: 10.21668/health.risk/2017.1.15
18. Болдырев А.А. Разгадывая кроссворд природы. Рецензия на книгу Гильберта Линга «Физическая теория живой клетки (незамеченная революция)» Санкт-Петербург: Наука, 2008 // Биохимия. – 2009. – Т. 74, № 6. – С. 860–862.
19. Electron transport chain [Электронный ресурс] // Wikipedia: The free encyclopedia. – 2002. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Electron_transport_chain (дата обращения: 30.06.2018).
20. Energy transduction in the sodium F-ATPase of *Propionigenium modestum* / P. Dimroth, H. Wang, M. Grabe, G. Oster // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 1999. – Vol. 96. – P. 4924–4929.
21. Oster G., Wang H. Reverse engineering a protein: the mechanochemistry of ATP synthase // Biochimica et Biophysica Acta Bioenergetics. – 2000. – Vol. 1458, № 2. – P. 482–510.
22. Gardiner C. Stochastic Methods. A handbook for the Natural and Social sciences. – New York: Springer, 2009. – Vol. 18. – 447 p.
23. Risken H. The Fokker-Planck Equation. Methods of Solution and Applications. – Berlin: Springer-Verlag, 1989. – 485 p.
24. A rotary molecular motor that can work at near 100 % efficiency / K. Kinosita Jr., R. Yasuda, H. Noji, K. Adachi // Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci. – 2000. – Vol. 355. – P. 473–489. DOI: 10.1098/rstb.2000.0589
25. Sommer A.P., Haddad M.Kh., Fecht H.-J. Light Effect on Water Viscosity: Implication for ATP Biosynthesis // Sci. Rep. – 2015. – Vol. 5. – 335 p. DOI: 10.1038/srep12029
26. Aging retinal function is improved by near infrared light (670 nm) that is associated with corrected mitochondrial decline / C. Sivapathasuntharam, S. Sivaprasad, C. Hogg, G. Jeffery // Neurobiol Aging. – 2017. – Vol. 52. – P. 66–70.
27. Final resolution of the 3rd Global Pediatric Congress [Электронный ресурс]. – London, 2018. – URL: <https://d2cax41o7ahm5l.cloudfront.net/cs/pdfs/pediatric-ophthalmology-2018-23511final-resolution-of-the-3rd-global-pediatric-congress-london-201846825.pdf> (дата обращения: 30.06.2018).
28. Кошиц И.Н., Эгембердиев М.Б. О научных итогах III Глобального конгресса по детской офтальмологии // Поле зрения. – 2018. – № 3. – С. 24–25.
29. Капцов В.А., Дейнего В.Н., Уласюк В.Н. Полупроводниковые источники белого света с биологически адекватным спектром излучения // Глаз. – 2018. – Т. 119, № 1. – С. 25–38.

Капцов В.А., Дейнего В.Н., Уласюк В.Н. Энергетический потенциал митохондрий в условиях светодиодного освещения и риски заболевания глаз // Анализ риска здоровью. – 2019. – № 2. – С. 175–184. DOI: 10.21668/health.risk/2019.2.19

UDC 614/5: 644.36

DOI: 10.21668/health.risk/2019.2.19.eng



ENERGY POTENTIAL OF MITOCHONDRIA UNDER LED LIGHTING AND RISKS OF EYES DISEASES

V.A. Kaptsov¹, V.N. Deinego², V.N. Ulasyuk³

¹All-Russian Research Institute of Railway Hygiene, 1 Pakgauznoe shosse Str., Bldg. 1, Moscow, 125438, Russian Federation

²«Biolumen» scientific and technical center, 8 Mira av., Fryazino, Moscow, 141195, Russian Federation

³«Platan Scientific Research Institute with In-House Plant» PLC, 2 Zavodskoy lane, Fryazino, 141190, Russian Federation

Disorders in refraction, myopia and other eye disorders lead to a decrease in efficiency of any activity and impose certain limitations on educational and working capabilities of economically active population. As light denaturation grows, fatigue caused by performing test visual efforts also increases. The lowest decrease in physiological and mental parameters occurs when a person works under natural luminance, and the greatest one, under completely artificial luminance. Artificial light sources, as opposed to an even sunlight spectrum, have peaks and notches in photon flow under specific wave lengths.

It is shown in the paper that a drastic decrease in spectral-energy characteristics occurs in red light area with wave length 670 nm as compared to sunlight spectrum. The authors consider how 670 nm red light deficiency influences visual analyzer cells and mitochondria in particular. A theory that focuses on mitochondria aging states that oxidative stress caused by DNA mutations in mitochondria is associated with a decrease in adenosine triphosphate (ATP) production leading to cell degeneration. A rate at which this degradation develops is related to metabolic demands of a body, progressing inflammation in

the outer retina, macrophages penetration and cells loss; as a result, eye sight deteriorates. A mechanism of a decrease in efficiency of ATP-synthesizing structures is examined within "670 nm light – water structural properties – efficiency of mitochondria rotary engine operations" cause-and-effect chain. The authors substantiate the necessity to synthesize red 670 nm luminophor and to optimize LED lighting in this spectrum area.

Key words: red 670 nm light, water structure, ATP synthesis efficiency, energy potential of mitochondria, LED lighting.

References

1. Erisman F.F. Izbrannye proizvedeniya [Selection]. Moscow, Medgiz Publ., 1959, vol. 1, 390 p.
2. Jung S.-K., Lee J.H., Kakizaki H., Jee D. Prevalence of Myopia and its Association with Body Stature and Educational Level in 19-Year-Old Male Conscripts in Seoul, South Korea. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2012, vol. 53, no. 9, pp. 5579–5583. DOI: 10.1167/iops.12-10106
3. Kaptsov A., Deinego V.N. Fotobiologicheskaya bezopasnost' i tekhnicheskaya politika na svetodiodnom rynke [Photobiological safety and technical policy on the LED market]. *Energosovet*, 2016, vol. 46, no. 4, pp. 42–46.
4. Markova E.Y., Pron'ko N.A., Aminulla L.V., Venediktova L.V., Bezmelnitsyna L.Y. To the Question of School Myopia. *Oftal'mologiya*, 2018, vol. 15, no. 1, pp. 87–91. DOI: 10.18008/1816-5095-2018-1-87-9
5. Medvedev A.V. Hygienic methods of prevention of emergence and progressing of school short-sightedness. *Zdorov'e i obrazovanie v XXI veke*, 2013, vol. 15, no. 1–4, pp. 309–311.
7. Konferentsiya «Miopiyu pod kontrol'. Rossiiskii i zarubezhnyi opyt»: osnovnye vyvody [The Conference entitled "To control myopia. Russian and foreign experience": basic conclusions], 2018. Available at: <https://med.vesti.ru/press-relizy/konferentsiya-miopiyu-pod-kontrol-rossijskij-i-zarubezhnyj-opyt-osnovnye-vyvody/> (29.06.2018).
8. Skobareva Z.A., Teksheva L.M. Biologicheskie aspekty gigienicheskoi otsenki estestvennogo i iskusstvennogo osveshcheniya [Hygienic assessment of natural and artificial lighting: biological aspects]. *Svetotekhnika*, 2003, no. 4, pp. 7–13.
9. Goncharov N.P., Kireev N.N. Zritel'naya rabotosposobnost' pri estestvennom i ikusstvennom osveshchenii [Visual efficiency under natural and artificial lighting]. *Svetotekhnika*, 1977, no. 9, pp. 5–7.
10. Ying-Ying H., Sharma S.K., Carroll J., Hamblin M.R. Biphasic dose response in low level light therapy – an update. *Dose-Response: An International Journal*, 2011, vol. 9, no. 4, pp. 602–618. Available at: http://scholarworks.umass.edu/dose_response/vol9/iss4/11 (29.06.2018). DOI: 10.2203/dose-response.11-009.Hamblin
11. Konev S.V., Volotovskii I.D. Fotobiologiya [Photobiology]. Minsk, Belarusian State University Publ., 1979, 384 p.
12. Agroskin L.S., Papayan G.V. Tsitofotometriya. Apparatura i metody analiza kletok po svetopogloshcheniyu [Cytophotometry. Devices and techniques for analyzing light-absorbing cells]. Leningrad, Nauka Publ., 1977, 273 p.
13. Kaptsov V.A., Deinego V.N. Analytical review: Light-biological safety and risks of eye diseases among school child in classrooms with led light sources? Proceedings of 3rd Global Pediatric Ophthalmology Congress 2018. *Journal of Clinical & Experimental Ophthalmol*, London, 2018, vol. 9, pp. 58–59.
14. Kaptsov V.A., Deinego V.N. Immunnaya sistema i iskusstvennaya svetovaya sreda [Immune system and artificial lighting]. *Allergologiya i immunologiya*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 253–258.
15. Deinego V.N., Kaptsov V.A., Soroka A.I. Influence of light and physical fields on risk of disharmonization of melatonin synthesis in the pineal gland. *Health Risk Analysis*, 2014, no. 2, pp. 30–41. DOI: 10.21668/health.risk/2014.2.04.eng
16. Deinego V.N., Kaptsov V.A. Visual hygiene in LED lighting. Modern scientific imaginations. *Gigiena i sanitariya*, 2014, vol. 93, no. 5, pp. 54–58.
17. Deinego V.N., Kaptsov V.A. Disorders in melanopsin effect of pupil constriction as a risk factor causing eye diseases. *Health Risk Analysis*, 2017, no. 1, pp. 132–148. DOI: 10.21668/health.risk/2017.1.15.eng
18. Boldyrev A.A. Razgadyvaya krossvord prirody. Retseziya na knigu Gil'berta Linga «Fizicheskaya teoriya zhivoi kletki (nezamechennaya revolyutsiya)» Sankt-Peterburg: Nauka, 2008 [Doing crosswords proposed by nature. A review on a book by Gilbert Ling "A physical theory of the living cell (the hidden revolution) " Saint Petersburg: Nauka 2008]. *Biokhimiya*, 2009, vol. 74, no. 6, pp. 860–862.
19. Electron transport chain. *Wikipedia. The free encyclopedia*, 2002. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Electron_transport_chain (30.06.2018).
20. Dimroth P., Wang H., Grabe M., Oster G. Energy transduction in the sodium F-ATPase of *Propionigenium modestum*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1999, vol. 96, pp. 4924–4929.
21. Oster G., Wang H. Reverse engineering a protein: the mechanochemistry of ATP synthase. *Biochimica et Biophysica Acta Bioenergetics*, 2000, vol. 1458, no. 2, pp. 482–510.
22. Gardiner C. Stochastic Methods. A handbook for the Natural and Social sciences. New York, Springer Publ, 2009, vol. 18, 447 p.

© Kaptsov V.A., Deinego V.N., Ulasyuk V.N., 2019

Valerii A. Kaptsov – Doctor of Medical Sciences, The Corresponding Member of the RAS, Head of the Occupational Hygiene Department (e-mail: kapcovva39@mail.ru; tel.: +7 (499) 15-33-628; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3130-2592>).

Vitalii N. Deinego – Senior researcher (e-mail: vn-led@bk.ru; tel.: +7 (916) 530-68-82).

Vladimir N. Ulasyuk – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief scientific consultant (e-mail: v_n_uls@mail.ru; tel.: +7 (495) 70-29-658; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1130-710X>).

23. Risken H. The Fokker-Planck Equation. Methods of Solution and Applications. Berlin, Springer-Verlag Publ., 1989, 485 p.

24. Kinoshita Jr. K., Yasuda R., Noji H., Adachi K. A rotary molecular motor that can work at near 100 % efficiency. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, 2000, vol. 355, pp. 473–489. DOI: 10.1098/rstb.2000.0589
25. Sommer A.P., Haddad M.Kh., Fecht H.-J. Light Effect on Water Viscosity: Implication for ATP Biosynthesis. *Sci. Rep.*, 2015, vol. 5, 335 p. DOI: 10.1038/srep12029
26. Sivapathasuntharam C., Sivaprasad S., Hogg C., Jeffery G. Aging retinal function is improved by near infrared light (670 nm) that is associated with corrected mitochondrial decline. *Neurobiol Aging*, 2017, vol. 52, pp. 66–70.
27. Final resolution of the 3rd Global Pediatric Congress, London 2018. Available at: <https://d2cax41o7ahm5l.cloudfront.net/cs/pdfs/pediatric-ophthalmology-2018-23511final-resolution-of-the-3rd-global-pediatric-congress-london-201846825.pdf> (30.06.2018).
28. Koshits I.N., Egemberdiev M.B. O nauchnykh itogakh III Global'nogo kongressa po detskoj oftal'mologii [On scientific results of the III Global congress on children ophthalmology]. *Pole zreniya*, 2018, no. 3, pp. 24–25.
29. Kaptsov V.A., Deinego V.N., Ulasjuk V.N. Poluprovodnikovye istochniki belogo sveta s biologicheski adekvatnym spektrom izlucheniya [Semi-conductor white light sources with biologically adequate irradiation spectrum]. *Glaz*, 2018, vol. 119, no. 1, pp. 25–38.

Kaptsov V.A., Deinego V.N., Ulasjuk V.N. Energy potential of mitochondria under led lighting and risks of eyes diseases. Health Risk Analysis, 2019, no. 2, pp. 175–184. DOI: 10.21668/health.risk/2019.2.19.eng

Получена: 03.07.2018

Принята: 13.06.2019

Опубликована: 30.06.2019