

Л.А. Бондарева
А.В. Дунаев

**БИОТЕХНИЧЕСКИЕ МЕДИЦИНСКИЕ
СИСТЕМЫ ТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО
НАЗНАЧЕНИЯ**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Л.А. Бондарева, А.В. Дунаев

**БИОТЕХНИЧЕСКИЕ МЕДИЦИНСКИЕ
СИСТЕМЫ ТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО
НАЗНАЧЕНИЯ**

Рекомендовано редакционно-издательским советом ОрелГТУ
в качестве учебного пособия для вузов

Орел 2005

УДК 615.849.19(075)

ББК 53.54я7

Б81

Рецензенты:

Профессор, доктор технических наук

С.Ф. Корндорф

Профессор, доктор технических наук

А.Р. Евстигнеев

Б81 Бондарева, Л.А. **Биотехнические медицинские системы терапевтического назначения.** Учебное пособие / Л.А. Бондарева, А.В. Дунаев. – Орел: ОрелГТУ, 2005. – 64 с.

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 200300 «Биомедицинская инженерия» и специалистов по специальности 200402 «Инженерное дело в медико-биологической практике», изучающих дисциплину «Основы теории биотехнических систем».

Может быть полезно специалистам медицинского и технического профиля, занимающимся вопросами теории и проектирования биотехнических медицинских систем терапевтического назначения.

УДК 615.849.19(75)

ББК 53.54я7

© ОрелГТУ, 2005

© Бондарева Л.А.,

Дунаев А.В., 2005

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Основы теории биотехнических систем	6
1.1 Понятие и особенности биотехнических систем	6
1.2 Бионический подход при решении инженерных задач	8
1.3 Основные свойства биотехнических систем	11
1.4 Основные функциональные характеристики сложных систем	14
2 Биотехнические системы медицинского назначения	20
2.1 Исследовательские биотехнические системы	20
2.2 Биотехнические системы управления состоянием живого организма	23
2.3 Метод биологической обратной связи	25
3 Биотехнические медицинские системы терапевтического назначения	31
3.1 Основы синтеза биотехнических медицинских систем терапевтического назначения	31
3.2 Классификация биотехнических медицинских систем терапевтического назначения	32
3.3 Основные структурные схемы и особенности реализации биотехнических медицинских систем терапевтического назначения	32
4 Биотехнические системы лазерного воздействия	35
4.1 Физические основы лазерной терапии	35
4.2 Оценка влияния силы стимулирования лазерного излучения	36
4.3 Взаимодействие лазерного излучения с биологическими тканями	37
4.4 Алгоритм получения и обработки информации при низкоинтенсивной лазерной терапии внутренних органов ...	43
4.5 Связь параметров биотехнических систем лазерного воздействия	45
4.6 Теоретические основы квантовой медицины	50
4.7 Основы биоуправляемой лазерной хронотерапии	52
Литература	63

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений развития современной науки и техники последних десятилетий является объединение ученых и специалистов точных и биологических наук, обусловленное необходимостью разработки общей теории систем, в состав которых входят тесно связанные между собой технические и биологические элементы. Потребность в таком взаимодействии, обмене опытом, научной информацией и идеями представителей биологических и технических наук ощущается при решении задач, свойственных этим наукам и возникающих на их стыке.

К настоящему времени накоплены достаточные знания в изучении структуры и функционирования живого и разработана необходимая техническая база для постановки биотехнических исследований, которые выступают одновременно и биологическими, и техническими. Причем существование этого направления невозможно без преобразования биологических объектов, без конструирования их искусственных аналогов. Поэтому в основе синтеза биотехнических систем лежит бионическая методология, предполагающая исследование именно тех особенностей строения и функционирования живого организма, которые необходимы и достаточны для решения конкретных задач синтеза систем определенного назначения.

Область применения биотехнических систем весьма разнообразна, и к ним по праву относятся как системы эргатического типа, в которых человек выполняет роль управляющего звена, так и технические системы, управляющие состоянием организма человека (например, система искусственного кровообращения и дыхания) и целыми популяциями живых организмов (биотехнические системы принудительного управления поведением животных).

Биотехнические системы отличаются крайним многообразием параметров и неоднозначной связью их параметров с изменениями, протекающими внутри и вне исследуемых объектов и систем. Но, несмотря на значительные различия в функционировании приведенных систем, для всех них определяющим является принцип адекватности согласования «управленческих» характеристик технических и биологических элементов системы и принцип идентификации информационной среды. Последний требует оптимизации интенсивности потоков и формы предъявления

информации, которой обмениваются технические и биологические элементы. Кроме этого синтез технической части системы обязательно должен проводиться с учетом морфологических и психофизиологических особенностей сопрягаемой биологической подсистемы.

В настоящее время среди биотехнических систем медицинского назначения выделяется особая группа терапевтических систем, работа которых направлена на нормализацию состояния биологического объекта путем оказания на него различных лечебных воздействий. Особое место здесь отводится физиотерапевтическим методам воздействия, осуществляемым с помощью низкоинтенсивного лазерного излучения (НИЛИ), обладающего целым рядом специфических и уникальных свойств.

Существует более 100 различных модификаций лазерных терапевтических аппаратов, однако лечебный эффект, получаемый в результате их использования, далеко не всегда воспроизводим или гарантирован. Это вызывает дискуссии об оптимальных параметрах лазерного луча (плотность мощности, доза, время) и противопоказаниях к его использованию. До сих пор рекомендуемые параметры плотности мощности в разных руководствах отличаются в сотни и более раз (от 0,5 до 200 мВт/см²), а рекомендуемые дозы варьируют от 0,1 до 120 Дж/см². На практике многие врачи встречаются с негативными побочными влияниями, но, как правило, их объясняют неправильно выбранными параметрами, индивидуальной непереносимостью, сопутствующими заболеваниями. Возникло даже понятие «лазерная аллергия».

Решение поставленных проблем возможно с помощью коррекции лазерного воздействия во время процедуры. Основываясь на информации о состоянии пациента до и во время воздействия, т.е. непосредственно в процессе проведения физиотерапевтической процедуры, и используя цепи обратных связей, передающие эту информацию врачу, можно, меняя параметры воздействия, выбрать наиболее оптимальный режим, подходящий конкретному пациенту и избежать тем самым каких-либо отрицательных последствий. Особую роль играют связи, передающие управляющие сигналы о состоянии пациента непосредственно к техническим средствам воздействия на него, т.е. биологические обратные связи, с помощью которых параметры текущего состояния организма пациента используются в качестве управляющих сигналов и корректируют ход терапевтической процедуры.

И здесь следует отметить, что создание аппаратов с биологическим управлением является актуальной проблемой в теории биотехнических систем и именно ей посвящены многие современные разработки.

1 ОСНОВЫ ТЕОРИИ БИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

1.1 Понятие и особенности биотехнических систем

Проблема создания биотехнических систем отражает одну из важнейших сторон научно-технического прогресса – объединение и консолидацию ученых и специалистов точных и биологических наук.

Биотехническая система (БТС) – это особый класс больших систем, представляющий собой совокупность биологических и технических элементов, связанных между собой в едином контуре управления /1/. При этом конструктивное решение технических элементов должно быть таким, чтобы оно максимально способствовало взаимодействию с биологическими элементами. БТС включает в себя биологические и технические подсистемы, которые объединены прямыми и обратными связями и общими алгоритмами управления (рис. 1.) /2/.

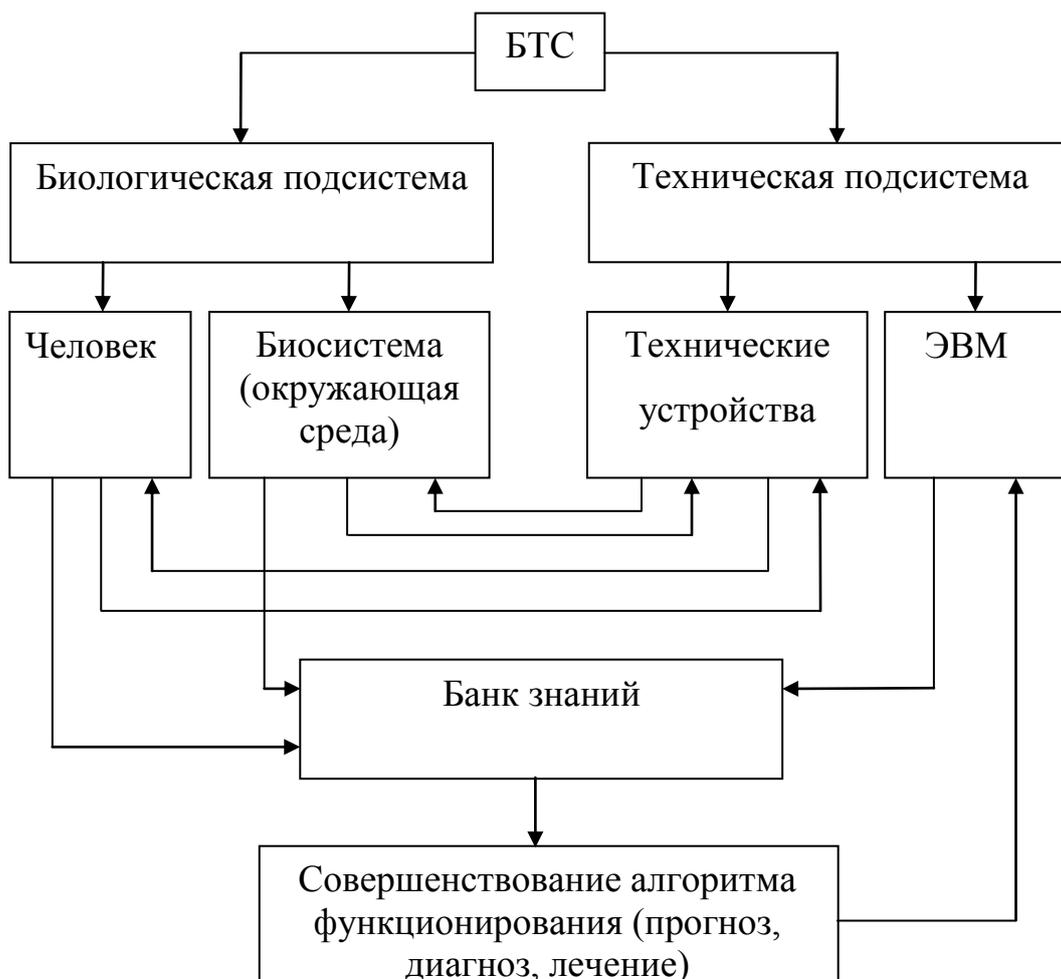


Рис.1. Схема биотехнической системы /2/

Каждой из выделенных подсистем присуща своя специфика и свои особенности. Особенности биологической подсистемы является то, что:

- она характеризуется структурной и функциональной сложностью;
- все параметры биологической подсистемы изменяются с различными скоростями;
- важнейшим свойством этой подсистемы является гомеостаз, т.е. сохранение количественных показателей важнейших параметров вне зависимости от внешних воздействий в определенных пределах;
- в живом организме согласованно действуют подсистемы, реагирующие на различные возмущения – химические, энергетические, информационные, а реакция организма на каждый вид возмущений характеризуется различными постоянными времени, лежащими в диапазоне от сотых долей секунд до нескольких часов (суток, месяцев).

Вследствие всего вышесказанного биологическую подсистему можно охарактеризовать как сложноорганизованную структуру со многими входами и выходами, в которой процессы протекают с различной скоростью, а в качестве выходных параметров может выступать следующее: концентрация веществ и скорость их изменения в различных физиологических системах, уровень и скорость изменения энергетических показателей, а также различные показатели поведенческих реакций. Измерение указанных параметров проводит техническая подсистема, а их корректировка возможна с помощью медикаментозных и иных способов воздействия.

Как объект исследования в качестве биологической подсистемы выступает человек либо функциональные системы его организма, а также другие живые организмы. Техническая подсистема включает различные устройства и целые комплексы и, как правило, ЭВМ, что соответственно требует разработки весьма сложных алгоритмов ее управления.

Для технической подсистемы свойственны свои особенности:

– она может иметь различный уровень сложности, а устройства технической подсистемы могут вмешиваться в функционирование любого контура всей биотехнической системы;

– вмешательство может быть различным, что зависит от назначения биотехнической системы. В большинстве случаев вмешательство носит характер информационного воздействия, т.е. техническая подсистема выдаёт сигналы, влияющие на изменение состояния центральных и периферических нервных механизмов (психоэмоциональное воздействие), кроме этого возможно вмешательство физической нагрузки, температурных, лазерных, радиобиологических и других воздействий. Причём временная константа этих воздействий на порядок больше, чем у информационного воздействия. В лечебных биотехнических системах возможно вмешательство на уровне обмена веществ. В этом случае внешним управляющим сигналом является вещество, время действия которого от нескольких минут до нескольких часов.

К биотехническим системам в одинаковой степени относятся системы, в которых человек выполняет роль управляющего звена (системы эргатического типа), и технические системы, управляющие организмом человека (искусственное дыхание, кровообращение) и целыми популяциями живых организмов (биотехнические системы принудительного управления поведением животных). Преимущество БТС перед техническими и биологическими системами заключается в сочетании положительных качеств обеих систем при взаимной компенсации их недостатков. Однако различная природа сочетаемых систем делает особенно важным в процессе синтеза БТС выбор режимов функционирования технической части системы и применение таких конструктивных решений элементов, которые бы максимально соответствовали морфологическим и психофизиологическим особенностям сопрягаемых с ней биологических объектов системы.

1.2 Бионический подход при решении инженерных задач

Человек давно искал ответ на вопрос: может ли он достичь того же, чего достигла живая природа? Для этого ему пришлось заглянуть внутрь “живых моделей” и разгадать “секреты” действия биологических систем, созданных в мастерской природы. В полной

мере это стало возможным только в XX веке, когда бурное развитие технической мысли привело к осознанию взаимосвязи биологических и технических дисциплин и обусловило развитие нового раздела науки, названного бионикой. В отличие от многих других научных дисциплин бионика имеет точную дату рождения – 13 сентября 1960 г., день открытия в Дайтоне американского национального симпозиума на тему «Живые прототипы – ключ к новой технике». *Бионику* определили как раздел кибернетики, занимающийся изучением строения и жизнедеятельности организмов в целях постановки и решения новых инженерных задач для создания новых приборов, механизмов, систем и совершенствования существующих. ***Бионика – это междисциплинарная наука, она синтезирует имеющиеся знания по биологии и радиотехнике, химии и кибернетике, физике и психологии, биофизике и приборостроению.***

Как видно из приведенного определения, в задачи бионики входит не только структурный и функциональный анализ биосистем, но и применение полученных закономерностей и собранной информации для построения уже рукотворных, то есть технических, систем управления, призванных решать разнообразные задачи, стоящие перед обществом. Другими словами, ученые пришли к выводу о том, что биологические системы, развивавшиеся в ходе естественной эволюции в силу объективных законов (отбора, наследственности и изменчивости), обладают рядом уникальных особенностей, которые пока не удалось реализовать в технических вычислительных и управляющих системах и которые принесли бы немалый эффект (экономический и социальный) в результате их использования.

Среди особенностей биологических систем пристальное внимание исследователей привлекает, прежде всего, способность биосистем к адаптации, то есть приспособление к изменениям факторов внешней среды. Сохранение устойчивости биосистемы (следовательно, и жизнестойкости) в условиях непрерывно меняющегося внешнего мира немыслимо без этого свойства, а качество адаптации оценивается уровнем гомеостаза, т.е. способностью биосистем сохранять постоянство своих внутренних параметров. Заслуживают внимание и структурные аспекты реализации биологических систем, механизмы действия прямой и обратной связи, активного и

пассивного управления, способность к репродукции (т.е. воспроизводству самих себя), ритмичность и развитие биосистем, под которым понимается такое необратимое их изменение, приводящее к возникновению новых качественных состояний.

Перспективными направлениями развития бионики является изучение нервной системы человека и животных для совершенствования вычислительной техники, органов их чувств для разработки новых датчиков и систем обнаружения; принципов навигации, ориентации и локации, используемых животными и т. д. Однако существует и целый ряд проблем, который ограничивает возможности человека при воплощении особенностей биосистем в технические объекты:

1. Техника долгое время развивалась вне связи с биологией, и природа не составила для инженеров точных ссылок на то, где и у кого искать нужный аналог для создания той или иной технической системы.

2. Биологические объекты часто не могут быть рассчитаны из-за всей сложности и незнания законов их формирования современными методами инженерной и математической науки.

3. Совокупность методов и средств, с помощью которых человек смог бы разгадать тайны строение живых организмов, подробности происходящих в них жизненных процессов, устройство и принципы функционирования тончайших механизмов начали создаваться лишь недавно.

4. Живые системы значительно многообразнее и сложнее технических конструкций, поэтому для того чтобы познать “конструкцию” биологической системы, смоделировать ее и претворить ее принцип действия в реальном устройстве, исследователю необходимы универсальные знания. Однако до последнего времени наоборот шел процесс интенсивного дробления научных дисциплин, что привело к некоторому тормозу прогресса и к пониманию настоящей потребности в такой организации знаний, которая позволила бы охватить их целиком, интегрировать на основе единых всеобъемлющих принципов.

Бионика исследует структуру и функционирование биологических объектов различной сложности с целью создания новых, более совершенных технических устройств и синтеза биотехнических комплексов, оптимально использующих свойства биологических и технических элементов, объединенных в единую функциональную систему целенаправленного поведения. При решении прикладных

инженерных задач эффективно используется бионический подход. Такой подход используется в решении проблемы, получившей название синтеза биотехнических систем, и предполагает изучение свойств биологических объектов с целью их адекватного сопряжения с техническими устройствами в единые биотехнические системы.

Выделяют три *основные задачи синтеза БТС* /1/, которые осуществляются на основе бионической методологии:

1. Выживаемость системы при изменении факторов внешней и внутренней среды и приспособление ее к изменению этих факторов. Таким образом, совокупность технических и биологических подсистем и связей между ними должна обеспечить реализацию целевой функции системы в нестационарной внешней среде, оказывающей дезорганизующее и разрушающее воздействие на систему.

2. Живая часть системы должна непрерывно получать информацию о состоянии внешней среды, характере поставленной перед БТС задачи и ее динамических изменениях, а также о состоянии сопряженных с ней технических элементов системы. При этом форма представления информации должна быть удобной для восприятия, адекватной и достаточной для построения модели ситуации, в которой находится вся подсистема, что позволит правильно и вовремя скорректировать алгоритм или режим функционирования биологической подсистемы.

3. Адаптации технических элементов системы, их совокупности и режимов функционирования к изменению состояния сопряженной с ними биологической системы. Эта задача решается путем создания систем непрерывной (текущей) диагностики состояния живого организма. При этом система текущей диагностики может быть либо самостоятельной, либо подсистемой контура диагностики и нормализации состояния.

Вследствие этого, основываясь на бионическом подходе при решении инженерных задач, на Международной конференции по бионике в Варне (1975 г.) было предложено и принято определение: ***биотехническая система – это совокупность биологических и технических элементов, объединенных в единую функциональную систему целенаправленного поведения.***

1.3 Основные свойства биотехнических систем

Основным свойством БТС является ее *суперадаптивность* /1/, то есть наличие двух контуров адаптации: внешнего и внутреннего. Внешний контур обеспечивает биотехнической системе возможность выполнять свою целевую функцию в условиях переменных воздействий внешних факторов. Внутренний контур позволяет элементам БТС взаимно адаптироваться к изменению состояния друг друга, вызванного воздействием как внешних, так и внутренних факторов.

Таким образом, наличие в БТС биологических звеньев позволяет придать общим свойствам системы особую пластичность, улучшить адаптивные характеристики во внешнем контуре адаптации. В то же время качество внутренней адаптации существенно зависит от возможностей технических элементов системы следить за изменением состояния биологических звеньев и, обмениваясь информацией с живой частью системы, соответственно изменять свои характеристики.

При анализе биообъекта как элемента БТС необходимо учитывать диапазоны параметров взаимодействующих с ним физических полей, с помощью которых осуществляется непосредственный контакт с биообъектом, в частности, при лазерном воздействии (рис. 2). Эти параметры взаимодействующих с объектом полей не должны превышать физиологический диапазон, при котором возможны необратимые изменения или патологические состояния.

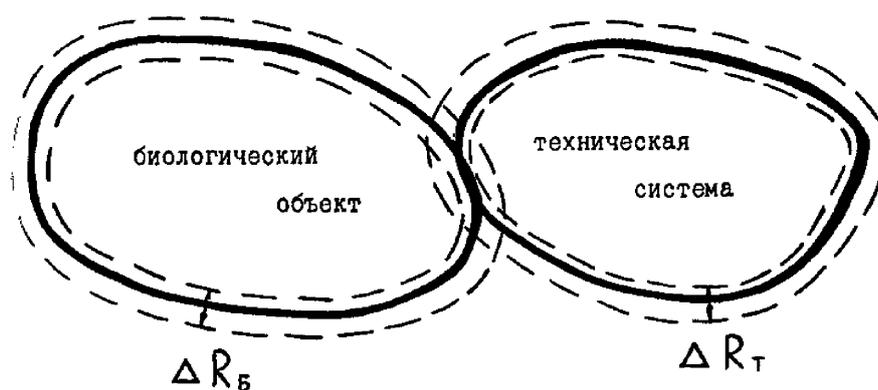


Рис. 2. Параметры адаптации биологической и технической систем применительно к лазерным системам

Выделяют величину ΔR , называемую радиусом адаптации, причем ΔR_B называют радиусом адаптации биологической подсистемы в БТС (в качестве примера рассматриваются как оптические свойства – отражение, рассеяние, поглощение, так и тип биоткани, глубина расположения патологии, физиологическое состояние и др.), а ΔR_T – радиусом адаптации технической подсистемы в БТС (длина волны, мощность, монохроматичность, расходимость пучка излучения, конструкция биофотометра, время воздействия и др.)

БТС не способна правильно понять и выработать тактику терапевтического воздействия в случае превышения параметрами биообъекта адаптации технических элементов. Но если параметры технических элементов превышают адаптацию биообъекта, то воздействие, оказываемое БТС на него, может привести к негативным последствиям. Кроме этого широкий диапазон параметров живых систем, изменчивость понятия "норма" в их оценке, зависимость характеристик от многих трудно учитываемых факторов, взаимосвязь между параметрами разных систем организма создают дефицит информации о существе процессов, определяющих состояние биообъекта.

Варьирование параметров воздействия: частоты, мощности, времени экспозиции и т.д. – позволяет исследовать зависимости ответов объекта, то есть его реакцию на дозированное возмущение. Исследование ответов биосистемы и разработка новых методов и аппаратов для воздействия на нее являются одним из развивающихся направлений БТС.

Свойства БТС воплотились в *основных принципах сопряжения* биологической и технической подсистем в единой функциональной системе /1/:

1. *Принцип адекватности* требует согласования основных конструктивных параметров и “управленческих характеристик” биологических и технических элементов БТС.

2. *Принцип единства информационной среды* требует согласования свойств информационных потоков, циркулирующих между техническими и биологическими элементами как в афферентных, так и в эфферентных цепях БТС.

Особая сложность биотехнических систем обусловлена сложностью организма, представляющего собой единое взаимосогласованное функционирование многих физиологических

систем, а также несовершенством существующих методов исследования и математического аппарата, не позволяющего адекватно описывать данные системы. В связи с этим такие системы должны характеризоваться с более общих методологических позиций, в частности с позиции системного подхода, когда на первое место ставится не анализ составных частей объекта как таковых, а его характеристика как целого, раскрытие механизмов, обеспечивающих целостность объекта.

Вначале исследуются свойства биообъекта и на основании известных данных о механизмах взаимодействия лазерного излучения с биотканью и основных эффектах подбираются оптимальные параметры лазерного излучения (мощность, длина волны, режим генерации, экспозиция, поляризация и др.). Параметры возникающей зоны воздействия обусловлены параметрами технической системы, а также биологической системы и внешней среды.

На основе принципа единства информационной среды связь между этими тремя группами параметров определяет возможность оптимизации и управления воздействием, которое в данном случае является информационно-энергетическим. Таким образом, оптимизируемые параметры технической системы задаются характеристиками зоны воздействия с учетом соответствующих свойств биологической системы.

Если достигнута цель воздействия лазерного излучения на биообъект, то такое воздействие считается эффективным, что в реальных системах встречается редко. Неэффективность воздействия обусловлена реакцией объекта воздействия, которая может быть различной:

- реакция может быть предусмотрена;
- реакция не может быть предусмотрена, но происходит в соответствии с известными законами, связывающими ее с воздействием;
- реакция не может быть предусмотрена, и неизвестна зависимость между ней и воздействием.

1.4 Основные функциональные характеристики сложных систем

Исходя из определения, биотехнические системы по уровню сложности относят к группе больших или очень сложных систем, точно и подробно описать которые невозможно. Однако зачастую возникает необходимость сравнительного анализа различных систем, а в результате интеграции биологии и технических наук появилась возможность биологические системы описывать в понятиях технических наук.

Для этого используются функциональные характеристики систем, к которым относят **эффективность, надежность, качество управления, помехозащищенность, устойчивость и степень сложности** /1/.

Нужно отметить, что количественные характеристики могут быть получены как экспериментально, так и аналитически при точном математическом описании системы, но в любом случае они должны удовлетворять следующим условиям:

- зависеть от процесса функционирования системы;
- просто вычисляться или измеряться;
- давать наглядное и сопоставимое представление об одном из свойств системы;
- допускать (в пределах возможного) простую приближенную оценку по экспериментальным данным.

Эффективность. Процесс функционирования сложной системы представляется как совокупность действий ее элементов, подчиненных единой цели. При этом качество выполнения целевой функции и стоимости затрат, пошедших на ее достижение, оцениваются количественным (например, числовым, зависящим от функций, которые описывают внутренние процессы) или качественным (на уровне “хуже – лучше”) функционалом, значение которого определяет *эффективность* системы.

Показателем эффективности сложной системы называется величина (числовая характеристика), характеризующая степень приспособленности системы к выполнению поставленных перед нею задач. Поэтому вполне оправдано введение представления о некотором *пороге эффективности* (с точки зрения наблюдателя), превышение которого означает выполнение функции, а меньшее значение – невыполнение.

Показатель эффективности не является постоянной величиной и зависит от взаимоотношения системы с другими системами и средой.

В случае если система противодействует неблагоприятному влиянию другой системы или среды, ее показатель эффективности уменьшается. В наиболее общем виде идея противодействия любой системы внешнему воздействию выражена принципом Ле Шателье /1/. В соответствии с ним поддержание стабилизирующего процесса в условиях внешних воздействий требует некоторого уменьшения эффективности системы. При этом за уменьшением эффективности системы может последовать ее увеличение, изменение функций и пределов работоспособности системы.

Отклонение показателя эффективности от условного порога в большую сторону характеризует *запас прочности* системы, т.е. ее возможность сопротивляться неблагоприятным воздействиям и выполнять свою функцию. Уменьшение его ниже порога может привести к нарушению функций или к разрушению системы. Если принять во внимание, что каждая система имеет ограниченный ресурс, то можно сделать вывод о том, что любое воздействие, уменьшая ресурс, уменьшает возможности системы “сопротивляться” воздействиям. Значительное воздействие (или одновременное воздействие многих факторов) может привести к исчерпанию ресурса и к гибели системы, поэтому запас прочности можно выразить как разность между полным и используемым ресурсами, а *целью усовершенствования системы* является повышение полного ресурса (запасов внутренней энергии) за счет более эффективного функционирования при минимизации затрат энергии на ответные реакции.

Правильным является выбор таких частных показателей эффективности, которые наиболее полно отражают соотношение результатов и затраченных на их достижение средств. Наиболее часто вводимым ограничением при оценке эффективности системы является себестоимость – не более заданной величины. Любой показатель эффективности можно представить как

$$R = R(u_1, u_2, \dots, u_r, x_1, x_2, \dots, x_n),$$

т.е. R зависит от ряда параметров: где u_1, u_2, \dots, u_r – параметры системы; x_1, x_2, \dots, x_n – факторы воздействия из внешней среды. Аналитическое выражение для R может быть весьма сложным, оно зависит от структуры системы и алгоритма ее функционирования.

Надежность. В настоящее время требования, которые предъявляются к этой функциональной характеристике, становятся все более жесткими, т.к. растет ответственность, возлагаемая на системы, растет и цена возможной ошибки. Для сложных систем практически не имеют смысла традиционные критерии надежности, хорошо представляющие свойства простых систем, такие как “среднее время безотказной работы”, “вероятность безотказной работы в заданном интервале времени” и т. д. Поэтому решающим в оценке надежности сложных систем является правильный учет последствий (с точки зрения конечного эффекта функционирования системы), к которым приводят отказы тех или иных элементов.

Под *отказом* элемента понимается выход его характеристик за допустимые пределы или полное прекращение работы, что сопровождается изменением показателя эффективности. Пусть R_H^0 – эффективность системы при условии, что все элементы абсолютно надежны, а R_H^* – эффективность в случае, если отказы происходят с интенсивностью в заданных вероятностных пределах. Тогда величина $\Delta R = R_H^0 - R_H^*$ может быть выбрана в качестве показателя надежности сложной системы. Она характеризует разницу между идеальной и реальной эффективностью системы. В данном случае важно так же учитывать вероятность обнаружения выхода элементов из строя и вероятность своевременного их восстановления. Если величина ΔR мала, то заниматься повышением элементной надежности особого смысла нет, если же величина ΔR велика, то элементная надежность тоже должна быть высокой.

Следует обратить внимание на особое значение этой характеристики для биотехнических систем, содержащих биологические звенья. Вследствие сложности аналитического описания таких систем их надежность наиболее обоснованно определяется экспериментально.

Качество управления. Это один из наиболее важных критериев оценки сложных систем, включая и биотехнические. Все факторы, влияющие на качество управления, можно разделить на группы, связанные с качеством критериев управления, с частотой циклов управления, с качеством осведомительной информации и с алгоритмами управления.

Параметры управления системой обозначаются через $a'_{i_1}, a'_{i_2}, \dots, a'_{i_n}$. При экспериментальном управлении критерий управления

$F(a'_{i_1}, a'_{i_2}, \dots, a'_{i_n})$ имеет экстремум F^* при условии $a'_{i_1} = \overline{a'_{i_1}}, a'_{i_2} = \overline{a'_{i_2}}, \dots, a'_{i_n} = \overline{a'_{i_n}}$.

В идеальном случае экстремуму качества управления $F = F^*$ должен соответствовать также экстремум эффективности управления $R = R^*$. Однако не всегда удается за критерий качества управления выбрать критерий эффективности, так как очень часто достижение максимальной вероятности выполнения целевой функции ($P_0 \rightarrow P_{0\max}$) сопряжено с максимальной стоимостью выполнения ($Q_\Sigma \rightarrow Q_{\Sigma\max}$), поэтому действительная эффективность далека от оптимальной $R_\partial \neq R_{\partial\text{opt}}$.

Качество управления определяется путем сравнительной оценки нескольких вариантов управления, сопоставляя их показатели эффективности. Допустим, что система работает в двух режимах: режим A с эффективностью R_A и режим B с эффективностью R_B . Тогда можно рассмотреть величину $\Delta R = R_A - R_B$, позволяющую оценить наиболее эффективный из двух анализируемых режимов управления. Если для идеальной системы показатель эффективности принять за R_{ynp}^0 , причем такой, что выше величина R не существует, тогда оценка может стать абсолютной:

$$\Delta R_{\text{ynp}}^0 = R_{\text{ynp}}^0 - R_A.$$

Таким же способом можно оценивать качество управления применительно к элементам системы, например, операторам (их подготовленность и соответствие решаемой задаче). Величина R_{ynp}^0 в этом случае может быть вычислена или измерена на моделях. Затем, включая в контур управления человека, получают реальное значение эффективности R^* и находят абсолютную оценку $\Delta R = R_{\text{ynp}}^0 - R^*$, которая показывает, насколько снижается качество управления при переходе к реальной системе. Показатель ΔR становится также инструментом для оценки влияния того или иного мероприятия по организации деятельности человека, влияния смены алгоритма управления, изменения программы подготовки операторов и т. д.

Помехозащищенность. Обычно при анализе системы рассматриваются некоторые нормальные (типичные) условия ее работы. В этих условиях функционирование системы называется *невозмущенным*. Естественно, что реальные условия, как правило,

отличаются от нормальных, потому что система функционирует в условиях воздействия на нее различных внешних и внутренних факторов, которые изменяют параметры системы u_1, u_2, \dots, u_r в сторону $u_1^*, u_2^*, \dots, u_r^*$ и называются *помехой*. Изменения под действием помех для i -го параметра можно выразить следующим образом:

$$u_i^* = u_i^0 + \Delta u_i,$$

где u_i^* – возмущенное значение параметра;

u_i^0 – значение параметра u_i в нормальных условиях.

Аналогично для помех, воздействующих на внешние условия среды, получают следующие оценки:

$$\beta_j^* = \beta_j^0 + \Delta \beta_j,$$

где β_j^0 – параметры среды при нормальных условиях.

Помехозащищенность системы отражает ее способность работать с прежней эффективностью в условиях действия помех. Показатель помехозащищенности сложной системы можно записать в виде:

$$\Delta R_{ном}^0 = R_{ном}^0 - R_{ном}^*,$$

где $R_{ном}^*$ – эффективность в условиях действия помех.

Он указывает, насколько снижается эффективность функционирования системы в условиях воздействия внутренних и внешних помех.

Устойчивость. Под устойчивостью функционирования системы понимается ее способность сохранять требуемые свойства в условиях воздействия возмущений. Практически это понятие применимо по отношению к определенному виду возмущений и определенной численной характеристике системы. При этом чрезвычайно важно выделить области устойчивости системы, т.е. пределы изменения ее параметров, в которых система выполняет свои целевые функции достаточно эффективно.

Степень сложности системы. Обычно сложность системы определяется интуитивно, однако при синтезе систем и, особенно, при их сравнительном анализе на разных стадиях разработки необходимы количественные критерии для оценки этой характеристики.

Пусть имеется n типов элементов. Для каждого типа оценивается сложность i -го элемента числом T_i . Тогда обобщенная сложность

системы, состоящей из элементов со сложностью T_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), определяется как:

$$T = \sum_{i=1}^n T_i k_i,$$

где k_i – количество элементов i -го типа, входящих в систему.

Кроме оценки сложности элементов так же бывает важным введение оценки сложности связей. Максимально возможное число связей системы из $N \sum_{i=1}^n k_i$ элементов равно $N(N-1)$, число связей, реализуемых в системе, – M^* . Поэтому относительное число реализованных связей:

$$\alpha = \frac{M^*}{N(N-1)}.$$

С помощью этого коэффициента общая сложность системы может быть формально выражена как:

$$T = (1 + \nu\alpha) \sum_{i=1}^n T_i k_i,$$

где ν – коэффициент, учитывающий сложность связей по сравнению со сложностью элементов системы.

Рассмотренные функциональные характеристики сложных систем позволяют оценить последние с разных сторон, а кроме этого, несмотря на все различия реальных систем, делают возможным их объективное сопоставление и сравнение.

2 БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

2.1 Исследовательские биотехнические системы

Вся медико-биологическая информация, поступающая от пациента, делится на медленно изменяющиеся процессы (МИП) и быстро изменяющиеся процессы (БИП) /1/.

К МИП относятся процессы, частота изменения которых ниже 1 Гц, а мгновенные значения могут быть выражены цифрой. Примерами таких процессов могут выступать температура тела, частота дыхания, частота сердечных сокращений и т.п.

К БИП относятся, главным образом, электрофизиологические процессы, характеризуемые изменением электрических потенциалов на поверхности кожи или на отдельных локальных участках организма под кожей. Частотный диапазон БИП достаточно широк и ограничен частотами от 0,1 Гц до 1000 Гц. Примерами могут служить электрокардиосигнал (ЭКС), электроэнцефалограмма (ЭЭГ), электромиограмма (ЭМГ) и др. Кроме этого к БИП относят характеристики физиологических функций организма, измеряемые с помощью специальных датчиков-преобразователей и характеризуемые кривой изменения процесса во времени (плетизмограмма, кривая изменения объемной скорости кровотока, кривая пульсации артериального давления и т.д.).

Для проведения исследований и диагностики в медицине применяются БТС медицинского назначения (БТС-М), общая структурная схема которых содержит каналы получения и преобразования информации о МИП и о БИП (рис. 3) /1/.

Рассматриваемая БТС-М является медицинской измерительно-информационной и управляющей системой и предназначена для контроля за организмом и управления его состоянием.

Вся медико-биологическая информация о МИП поступает в виде электрических сигналов от датчиков-преобразователей первичной информации (ДПИ МИП), которые усиливаются в блоке усиления (БУ). Информация преобразуется в цифровую форму в блоке преобразования (БП), обычно в двоично-десятичный код, для ввода в автоматический анализатор состояний (ААС), а так же для регистрации в блоке регистрации (БР) и демонстрации на специальном табло или экране дисплея системы отображения информации (СОИ). БТС, в которых осуществляется только параметрический контроль без комплексной обработки данных, не имеют блока автоматического анализа состояний.

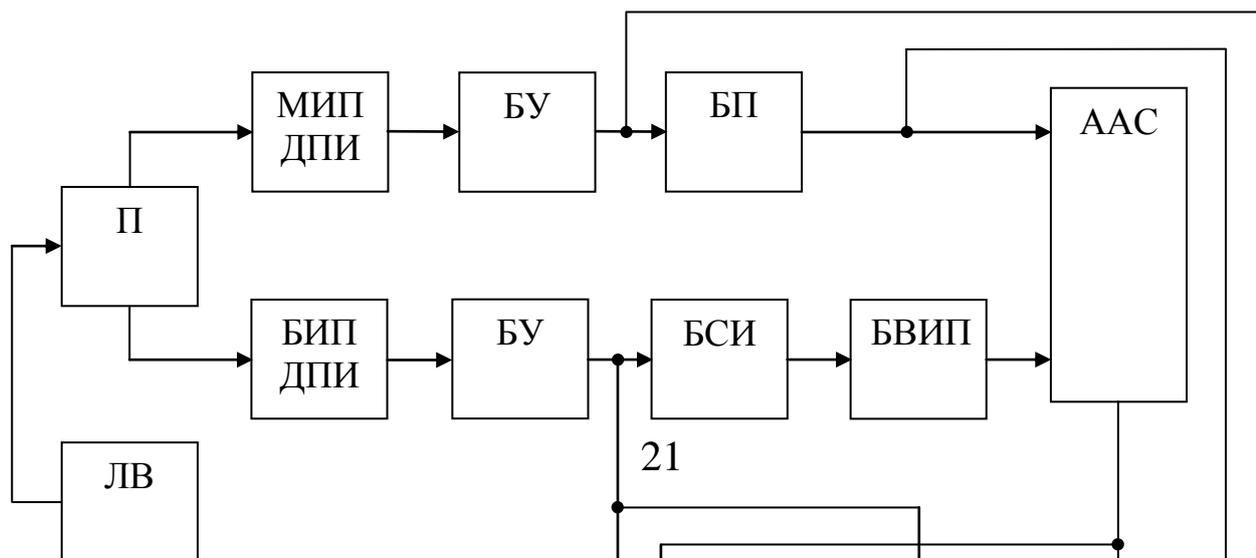


Рис. 3. Исследовательская БТС-М /1/

Измерительные каналы БИП отличаются от каналов МИП наличием блоков сжатия информации (БСИ) и блоков выделения информативных признаков (БВИП). Эти блоки реализуются на микропроцессорах с соответствующими жесткими программами.

Современные БТС-М позволяют проводить текущую диагностику состояния организма в реальном масштабе времени на основе комплексной обработки данных БИП и МИП в блоке ААС, представляющем собой либо микропроцессор, либо мини-ЭВМ. Данный тип имеет систему отображения информации СОИ, на которой, как правило, высвечивается в аналоговой форме сигнал о быстрых процессах (1), в цифровой и уровневой форме сигналы медленных процессов (3) и в виде условных обобщенных фигур – формализованные изображения состояний (2).

Врач *В* (исследователь), который также является элементом БТС-М, может через дисплей обратиться в блок долговременной (ДП) или оперативной памяти (ОП), где хранятся архивные или оперативно регистрируемые данные. Поступающая информация должна быть достаточно полной и позволять врачу создавать концептуальную модель состояния пациента (П), на основании которой возможно принятие решения о методе лечения и выборе лечебных воздействий (ЛВ).

Это требование является решающим для построения математической модели пространства состояний и состава диагностических признаков, а также разработки алгоритмов обработки информации в блоках выделения информативных признаков (*БВИП*) и автоматического анализатора состояний (*ААС*).

Подобные БТС применяются не только в медицинских лечебных учреждениях, но и используются в качестве подсистем для измерения и регистрации динамики изменения психофизиологического состояния организма оператора, находящегося в экстремальных условиях (работа в условиях перегрузки и невесомости, длительное воздействие гидростатического давления водной среды и т.д.). Рассматриваемая схема является типичной и используется для решения различных прикладных задач, направленных на поддержание работоспособности человека-оператора в сложных и экстремальных условиях, на стимуляцию отдельных органов и физиологических систем с целью устранения различного видов патологии их функционирования, на борьбу с вредным воздействием различных факторов внешней среды и на временное замещение функций органов и физиологических систем организма путем передачи их техническим устройствам, как например, в аппарате искусственного кровообращения, в аппарате искусственного дыхания, в системе искусственного гемодиализа и т.п.

В наиболее сложных БТС-М диагностическая подсистема аналогична уже рассмотренной, но поскольку результаты обработки биомедицинской информации должны быть использованы для управления состоянием организма, допустимо применение лишь тех методов, технических средств и математического аппарата, которые позволяют осуществить диагностические процедуры только в реальном масштабе времени.

2.2 Биотехнические системы управления состоянием живого организма

Исследование состояния биологического объекта и его управление проводится на основе следующей модели (рис. 4) /1/, в которой выделяется два канала: диагностический и оказания лечебного воздействия.

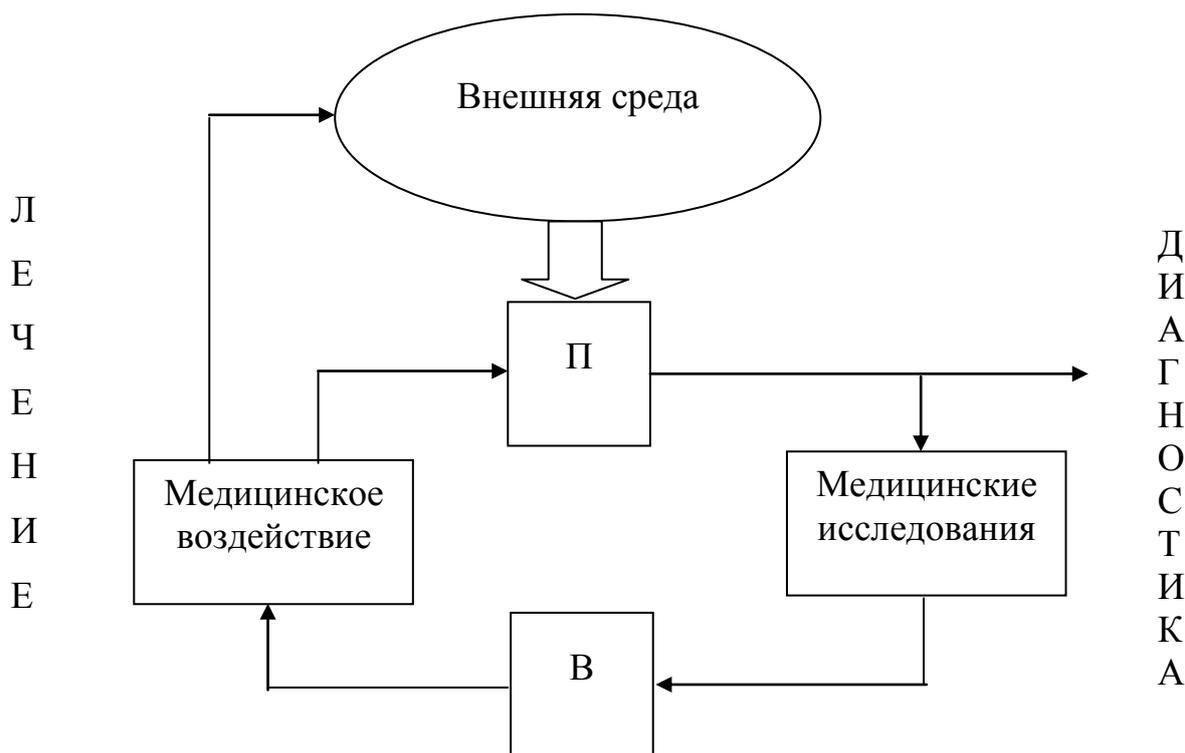


Рис. 4. Модель процесса исследования и управления состоянием биологического объекта /1/

Лечебное воздействие – это внешний фактор, направленный на восстановление биохимических или физиологических процессов в организме. Анализ состояния пациента *П* осуществляется на основании данных медицинских исследований, и по решению врача *В* применяется то или иное лечебное воздействие, количественный анализ которого, однако, затруднителен. Так, например, при приеме лекарственных препаратов концентрация лекарственного вещества определяется не только процессами всасывания, транспортирования, накопления, но и процессами его выделения и разрушения. Кроме того, кинетика химических реакций зависит от множества факторов. Подобные проблемы возникают и с другими формами лечебного воздействия.

К сожалению, ряд важнейших параметров, характеризующих состояние пациента, нельзя измерить в процессе проведения медицинского исследования, не нарушив его целостности, но именно они могут определять реакцию системы на воздействие.

Кроме этого внешняя среда, воздействующая на человека, нарушает биохимические и физиологические процессы, протекающие

в его организме. Количественной оценке эти воздействия зачастую не поддаются из-за многонаправленности действий на объект управления и влияния не только первичного возмущения, но и совокупности изменений, происходящих затем во внутренней среде. Так же возможно лечебное воздействие на пациента через внешнюю среду.

Основной задачей, ставящейся при управлении состоянием внутренней среды организма, является нормализация параметров этой среды, то есть лечение организма. Гомеостатическая норма является индивидуальной характеристикой отдельного организма, а управлять им можно *веществом, энергией или информацией*.

Воздействие на биологический объект или на его подсистемы физическими управляющими агентами, не изменяющими количества вещества биообъекта, называется *энергетическим управлением*. К такого рода агентам относят различные поля: электрическое, магнитное, тепловое, акустическое, радиационное, электромагнитное и др. Энергетическое воздействие стимулирует функционирование отдельных подсистем и подавляет некоторые патологические процессы, протекающие в больном организме. Причем физические поля могут подводиться через контактные электроды или специальные излучатели непосредственно к поверхности организма либо локально вводиться в его ткани, а подобные системы называют контактными. Кроме этого воздействие может осуществляться через среду, т.е. неконтактно.

Вещественное управление – это воздействие на биологический объект или на его подсистемы различными фармакологическими, гормональными, химическими и другими агентами в твердом, жидком или газообразном состоянии, предусматривающее неперенное изменение количества вещества, содержащегося в организме. Подобные системы могут быть как полностью автоматическими, так и полуавтоматическими, когда управляющее воздействие осуществляется врачом, получающим рекомендации, выданные ЭВМ.

Информационное управление – это управление состоянием человека с помощью специально сформулированных потоков информации, которое является наиболее эффективным, но и наименее формализованным из всех методов управления.

В любом случае, если управление осуществляется автоматически, главная роль в системе отводится подсистеме контроля за состоянием организма, которая содержит технические средства, непосредственно

сопряженные с организмом человека или предназначенные для временной или длительной компенсации утраченных функций.

2.3 Метод биологической обратной связи

Одной из отличительных черт современных методов лечения является стремление к активному подключению самого больного к процессу лечения на основании использования метода биологической обратной связи (БОС). Этот метод, как самостоятельное направление в медицине, возник в 60-70-ые годы XX века, чему предшествовала исследовательская работа в области физиологии, которая проводилась как в СССР, так и на Западе. Основой для создания метода БОС послужили фундаментальные исследования механизмов регуляции физиологических и развития патологических процессов, а также результаты прикладного изучения рациональных способов активации адаптивных систем мозга здорового и больного человека (на базе теории условных рефлексов И.М. Сеченова и И.П. Павлова).

Метод биологической обратной связи (БОС) в широком смысле представляет собой передачу человеку дополнительной, не предусмотренной природой информации о состоянии его органов и систем в доступной и наглядной форме /3/. На основе этой информации человек способен включать механизмы саморегуляции и целенаправленно использовать огромные функциональные возможности организма с целью совершенствования своих функций или поддержания их в норме и коррекции деятельности организма при патологических изменениях в нем. Причем абсолютных противопоказаний к применению метода БОС нет.

Реализуется метод биологической обратной связи следующим образом. Для примера проанализируем управление двигательной активностью человека и рассмотрим принципы управления функцией сокращения мышцы методом БОС. Накожный датчик регистрирует биоэлектрический сигнал, превращая его в амплитуду сокращения мышцы. Чем сильнее и продолжительнее ее сокращение, тем выше она отклоняется от нулевой отметки. Далее биоэлектрический сигнал передается в устройство биологической обратной связи и преобразуются в световой (амплитуда светового столбика на экране) и

звуковой (тональный) сигналы, т.е. человек начинает видеть и слышать, как сокращается его мышца.

Цепочка обратной связи замыкается, но для реализации метода БОС необходимы еще два обязательных условия: инструкция и мотивация для выполнения заданий инструктора БОС. Поэтому пациенту необходимо дать четкую словесную инструкцию, которая зависит от того, что следует выработать в мышце. Если она ослаблена после перелома, то нужно увеличить ее активность, и в этом случае инструкция может быть следующей: "Сокращайте мышцу так, чтобы на экране монитора высота светового столбика выросла и превысила установленный порог. Превышение порога будет отмечено поощряющим звуковым сигналом. Это означает, что вы правильно выполнили упражнение".

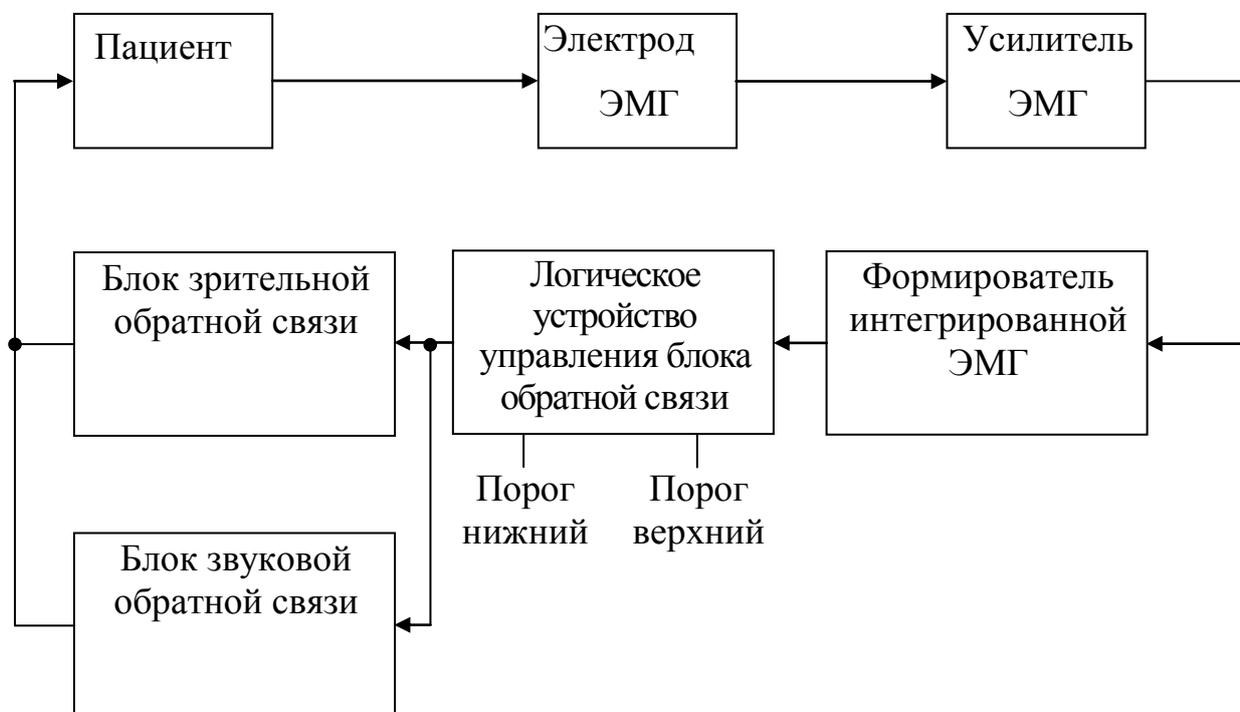
Второе условие заключается в необходимости создания сильной побудительной причины к правильному выполнению данного упражнения, что значительно повышает эффективность проводимой тренировки. Благодаря информации, полученной при помощи технических средств, пациент может выполнять упражнения наиболее оптимальным образом.

Функциональная блок-схема аппарата, реализующего представленный метод, показана на рис. 6, а /4/. Аппарат предназначен для повышения или восстановления функции мышц и может быть использован в медицинской реабилитации пациентов с двигательными нарушениями различной этиологии. Он обеспечивает управление амплитудой сокращения одной мышцы по трем алгоритмам: непрерывному, пропорционально-дискретному и пороговому.

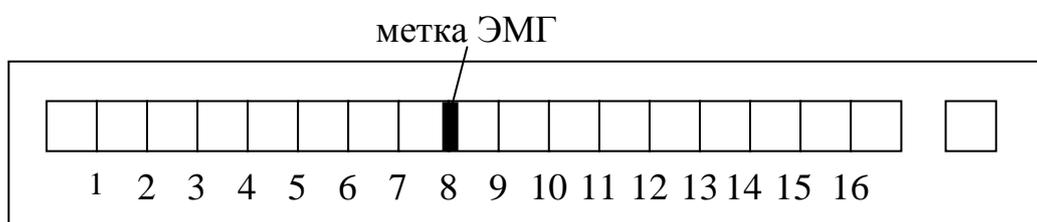
Электрод накладывается на двигательную точку тренируемой мышцы пациента, а на его контактную поверхность наносится электропроводная паста. При непрерывном режиме изменение амплитуды интегрированной электромиограммы (ЭМГ), полученное в формирователе, приводит к плавному изменению тональности звукового сигнала обратной связи и соответствует перемещению светящейся метки по линейно-дискретной шкале блока зрительной обратной связи (рис. 6, б) либо изменению звука в блоке звуковой обратной связи.

При пропорционально-дискретном режиме изменение амплитуды мышечного сокращения, т.е. амплитуды интегрированной ЭМГ,

сопровождается ступенчатым изменением тональности звукового сигнала и скачкообразным перемещением светового сигнала по световой линейно-дискретной шкале (рис. 6, б).



а



б



в

Рис. 6. Электромиографический аппарат биологической обратной связи:
 а – функциональная блок-схема аппарата; б – шкала перемещения метки в непрерывном и пропорционально-дискретном режимах работы;
 в – шкала перемещения метки в пороговом режиме

При пороговом режиме (рис. 6,в) амплитуда мышечных сокращений поддерживается такой, что светящаяся метка не должна покидать заданного межпорогового промежутка, а звуковой сигнал появляется в моменты превышения установленных границ.

Таким образом, аппарат биологической обратной связи по электромиограмме отражает изменение амплитуды сокращения одной мышечной группы в световом и звуковом сигналах обратной связи.

Применение метода БОС безболезненно для пациента; аппаратура БОС регистрирует сигналы организма (частоту дыхательных циклов, пульса, ритмы головного мозга, биоэлектрические сигналы, исходящие от мышц), не оказывая на человека непосредственного воздействия.

Применительно к БТС введение биологических обратных связей позволяет проводить коррекцию оказываемого на пациента воздействия с учетом его состояния до и во время процедуры, осуществляя тем самым *биологическое управление* системой. Особенностью биологического управления является то, что обеспечивается “идеальное” согласование воздействия с ритмом естественных жизненных процессов, поскольку управление совершается сигналами самого организма /1/.

В качестве сигналов биоуправления используются четкие проявления активности управляющего органа или системы, а особенно удобно применение биоэлектрических потенциалов, которые после усиления и другой обработки могут непосредственно выполнять роль командных сигналов. Однако оправдано это только в тех случаях, когда достаточно изучено физиологическое значение конкретных биопотенциалов и удастся довольно четко расшифровать их смысл, а, кроме того, отведение потенциалов надежно, просто и нетравматично.

Для функционального биоуправления на основе биологической обратной связи используются различные сочетания физиологических сигналов: электроэнцефалографических (ЭЭГ), вызванных потенциалов (ВП), реографических (РЕО), электрокардиографических

(ЭКГ), миографических (ЭМГ), температурных (Т), кожно-гальванической реакции (КГР), пневмограммы (ПГ), фотоплетизмограммы (ФПГ), давления и других в произвольном сочетании как в условиях покоя, так и при моделировании психоэмоционального напряжения (стресс-тестирование).

Стресс-тестирование позволяет объективизировать тип физиологической реакции на стресс и выбрать оптимальный набор параметров для организации контура комплексной БОС. При этом возможно использование нескольких параметров, отражающих состояние одной из систем организма, либо одновременный контроль параметров разных систем организма, например, совместный контроль кожной температуры и электромиограммы лицевой мускулатуры. Такая комплексная БОС может существенно облегчить понимание взаимоотношений между отдельными физиологическими системами, разработать для каждого пациента индивидуальную стратегию обучения и получить чувствительный инструмент текущего контроля эффективности процедур.

На настоящий момент разработаны стандартные формы представления информации по каналу биологической обратной связи:

- различные графики, шкалы, зрительные образы, диаграммы для отображения изменения регулируемых физиологических показателей пациенту;

- тематически подобранные видеоряды (слайды, видеоролики) с изменяемыми характеристиками их визуализации (размер, прозрачность, различные виды искажения, наплыв);

- музыкальные и звуковые фрагменты с изменяемыми характеристиками их воспроизведения (громкость, зашумленность, пространственное расположение источников звука с автономным управлением);

- специализированные формы представления.

Примеры индикаторов, предъявляемых пациенту в ходе процедур с биологической обратной связью, представлены на рис. 5 /5/.

Эффективным является одновременное использование различных форм представления информации, каждая из которых может быть использована для создания фона. Предусматривается также

возможность досрочного завершения этапа или процедуры либо в связи с достижением заданных критериев эффективности, либо при выходе важных физиологических показателей за допустимые пороги.

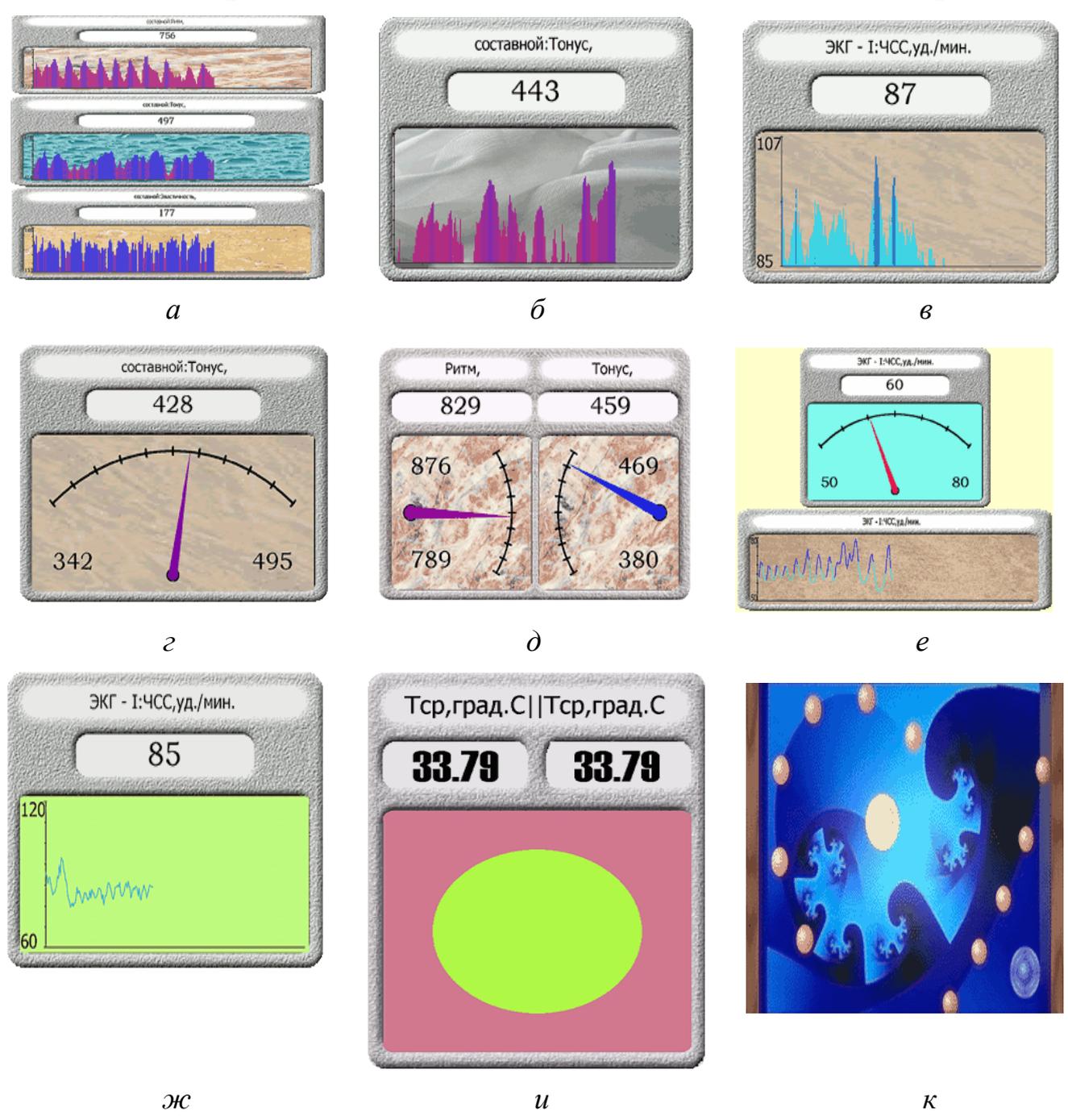


Рис. 5. Примеры индикаторов, предъявляемых пациенту в ходе процедур с биологической обратной связью /5/:
а – три графика с различными настройками фона и цвета; *б* – график;
в – график с изменением настроек фона и цвета; *г* – стрелочный индикатор;
д – парный стрелочный индикатор; *е* – стрелочный индикатор и график изменения параметра; *ж* – график изменения выбранного параметра; *и* – круг (или другая геометрическая фигура) с изменяющимся размером и цветом; *к* – изменяющийся фрактальный узор.

3 БИОТЕХНИЧЕСКИЕ МЕДИЦИНСКИЕ СИСТЕМЫ ТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

3.1 Основы синтеза биотехнических медицинских систем терапевтического назначения

Управляющие БТС, восстанавливающие естественные функции органов и физиологических систем больного человека, поддерживающие их в пределах нормы, а также выполняющие роль замещения утраченных физиологических функций организма, называются *биотехническими медицинскими системами терапевтического назначения (БТС-МТ) /1/*.

Основной проблемой БТС данного типа является то, что точность лечебных воздействий значительно отстает от точности диагностики, не обеспечивая максимального эффекта и строгой индивидуализации терапии. Для решения этих проблем при создании БТС индивидуализированной фармакотерапии используют *теорию динамического программирования*.

Суть этой теории заключается в том, что параметры объекта управления определяют не путем пассивного наблюдения, а методом активного вмешательства /1/. Первое дозированное лечебное воздействие проводится стандартным препаратом (функциональная проба), а спустя определенное время от организма получают ответную информацию, которую автоматически сопоставляют с исходной. В зависимости от “ответа” организма в него вводится соответствующая доза того же или другого препарата, и так далее до достижения положительного лечебного эффекта.

Таким образом, задача решается не сразу одним действием, а последовательно, на основе пошагового процесса лечения. Такая методика позволяет управлять состоянием организма даже при неполной информации. Однако применение ее осуществимо только в условиях замкнутости системы терапевтического процесса.

Различают три *способа построения терапевтических БТС /1/*:

1) системы, полный цикл работы которых протекает при отсутствии обратной связи с выхода на вход системы;

2) полуавтоматические БТС, в которых в течение полного цикла работы происходят паузы в процессе управления, во время которых человек-оператор (техник, лаборант, врач) корректирует действия терапевтической системы, выполняя функции цепи обратной связи;

3) автоматические БТС, полный цикл управления которыми происходит без участия человека-оператора, за счет реализации обратной связи с выхода на вход системы.

3.2 Классификация биотехнических медицинских систем терапевтического назначения

Классификация БТС-МТ довольно обширна. Выделяют следующие классификационные признаки:

– по *функциональному показателю* классифицируют в зависимости от источника управляющих сигналов, способа их отведения, характера управления (произвольный – по воле человека, непроизвольный – с использованием биопотенциалов), способа обработки сигнала и назначения устройства;

– по *структурному показателю* различают:

а) разомкнутые и замкнутые,

б) непрерывного и дискретного управления,

в) имплантируемые и экстракорпоральные системы;

– по *назначению системы* классифицируют в зависимости от объекта управления;

– по *принципам управления* разделяют системы, исходя:

а) из природы сигналов, с помощью которых ведется управление (биоэлектрические, механические, химические, термоэлектрические и т.д.);

б) из особенностей функционирования обратных связей (связи, реализующиеся в самих устройствах и реализуемые через изменения состояния физиологических систем организма);

в) иерархичности управляющих сигналов;

г) интегральных показателей функционирования системы;

– по *степени сложности структуры* выделяют простые детерминированные и сложные вероятностные системы.

3.3 Основные структурные схемы и особенности реализации биотехнических медицинских систем терапевтического назначения

Все БТС-МТ характеризуются наличием объекта управления $OУ$ и управляющего устройства-регулятора P , присоединенного к нему (рис. 7) /1/. Регулятор управляется сигналами от предыдущего устройства естественной или искусственной природы (вход A), а $OУ$ сам воздействует на другой объект в этом же организме либо взаимодействует с внешними предметами или организмами (выход B). В первом случае система является закрытой, во втором – открытой. В структурных схемах используются как биологические регуляторы $P_{ж}$, т.е. естественного происхождения (рис. 7, $a - в$), так и регуляторы в виде технических устройств P_m (рис. 7, $г - e$).

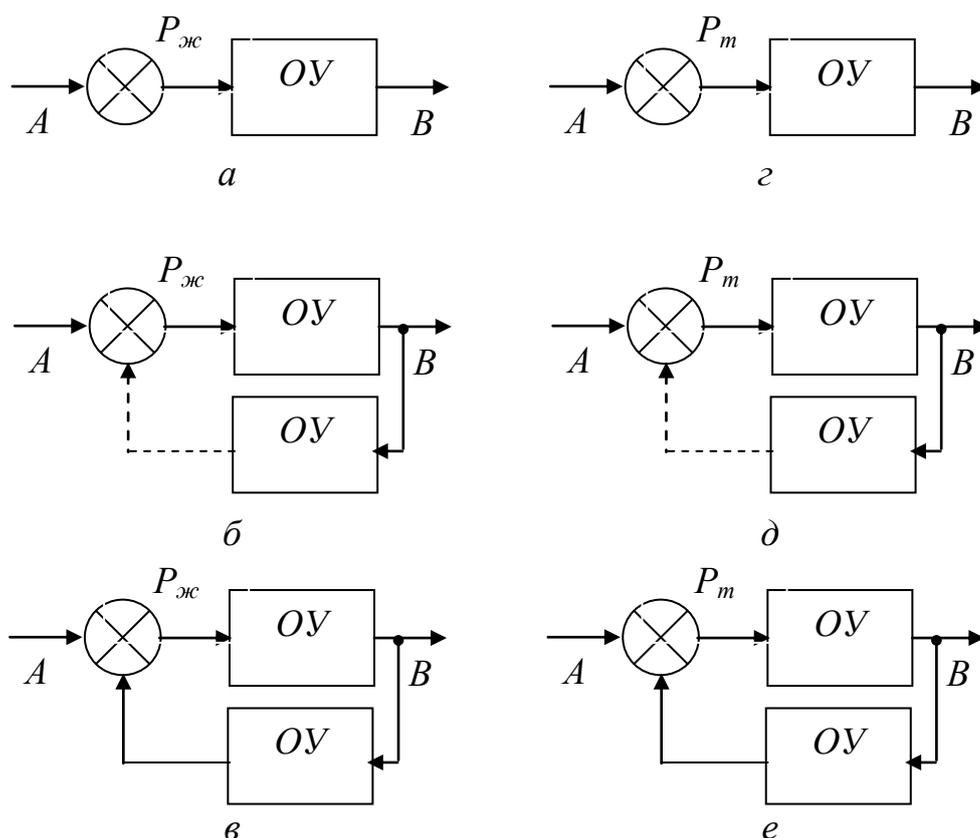


Рис. 7. Структурные схемы БТС-МТ /1/

Примером системы управления без биологической обратной связи (разомкнутая система) (рис. 7, а) может служить функциональный протез. Полуавтоматический режим работы системы (рис. 7, б) предполагает непостоянное действие обратной связи, когда врач корректирует работу системы в зависимости от получаемой информации (например, система поддержания гомеостаза с участием врача). Автоматический режим, т.е. с постоянно действующей обратной связью (рис. 7, в), представлен в той же системе поддержания гомеостаза, но уже без включения в контур управления врача, или электромеханическим протезом конечности.

Использование технических устройств в качестве регуляторов также может вестись в нескольких режимах. Например, система без обратной связи (рис. 7, г) действует в дефибриляторе в несинхронизированном режиме, полуавтоматический режим реализуется в имплантируемом или экстракорпоральном кардиостимуляторе, переходящем из режима биологической синхронизации в автоколебательный режим (рис. 7, д), а примером автоматической системы может служить имплантируемый электрокардиостимулятор, управляющий работой сердца и синхронизируемый сердцем же по цепи обратной связи (рис. 7, е).

Выделяют основные особенности реализации БТС-МТ:

1. Регулирующее воздействие должно быть синхронизировано с естественными процессами и ритмами.

2. Необходимо обеспечить быстрый анализ поступающей на вход БТС информации и незамедлительную выработку требуемого терапевтического воздействия.

Среди терапевтических систем особое место занимает широкий спектр физиотерапевтических систем, использующих низкоинтенсивное лазерное излучение, технические преимущества которого общеизвестны – это возможность локального равномерного облучения в широком диапазоне интенсивности светового потока, довольно высокая точность дозирования, использование волоконной оптики и специализированного световодного инструмента для подведения энергии лазерного излучения к патологическим очагам при их внутрисполостной локализации.

4 БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

4.1 Физические основы лазерной терапии

Плотность потока полезной мощности (ППМ) P лазерного излучения определяется по следующей зависимости /6/:

$$P = \frac{P_{\text{имп}} \cdot \tau \cdot f}{S_{\text{кв. см}}},$$

где P – облученность или плотность потока мощности (ППМ), Вт/см²;

$P_{\text{имп}}$ – паспортная мощность импульсного лазерного ИК-излучателя; Вт;

τ – длительность одного импульса (паспортные данные), с;

f – частота импульсов, Гц;

$S_{\text{кв. см}}$ – площадь облучения (при контактной методике равна площади выходного отверстия излучателя).

Величина P определяет за 1 секунду воздействие, т.е. отношение мощности излучения к площади поверхности, освещаемой лучом и перпендикулярной к направлению излучения.

Наиболее часто применяется другой параметр, который называют *плотностью потока энергии (ППЭ)*, Дж/см², или энергетической экспозицией E , которая равна произведению облученности на длительность сеанса терапии:

$$E = P \cdot t,$$

где t – время отпускаемой процедуры на данной частоте, с.

Значения P и E прямо пропорциональны частоте повторения импульсов f , устанавливаемой на аппарате.

Еще одним параметром, часто применяемым в лазерной терапии, является доза Q , Дж. Доза Q – это полная энергия лазерного излучения, полученная за сеанс и равная произведению средней мощности на длительность сеанса:

$$Q = P_{\text{имп}} \cdot \tau \cdot f \cdot t.$$

4.2 Оценка влияния силы стимулирования лазерного излучения

Для биофизической оценки реакций, происходящих в биоткани и во всем организме в целом, а также для качественной оценки влияния силы стимулирования (дозировки) лазерного излучения на вид биоэффектов используется закон Арндта – Шульца /7/.

Он гласит, что в биологических системах слабые стимулы дают сильные реакции, средние – умеренные реакции, умеренно сильные слегка тормозят систему, а очень сильные полностью блокируют ее. На графическом изображении закона Арндта – Шульца (рис. 8) условно представлено состояние малого объема клеток биоткани (1), части органа или целого органа (2) и всего организма в целом (3). Состояние, отмечающееся при воздействии на биообъекты лазерного излучения, проходит несколько последовательных стадий. Слева идет зона нечувствительности (уровни излучения много меньше уровня внешнего фона), когда ни субъективными, ни объективными методами не удастся уловить первичную реакцию биообъекта.

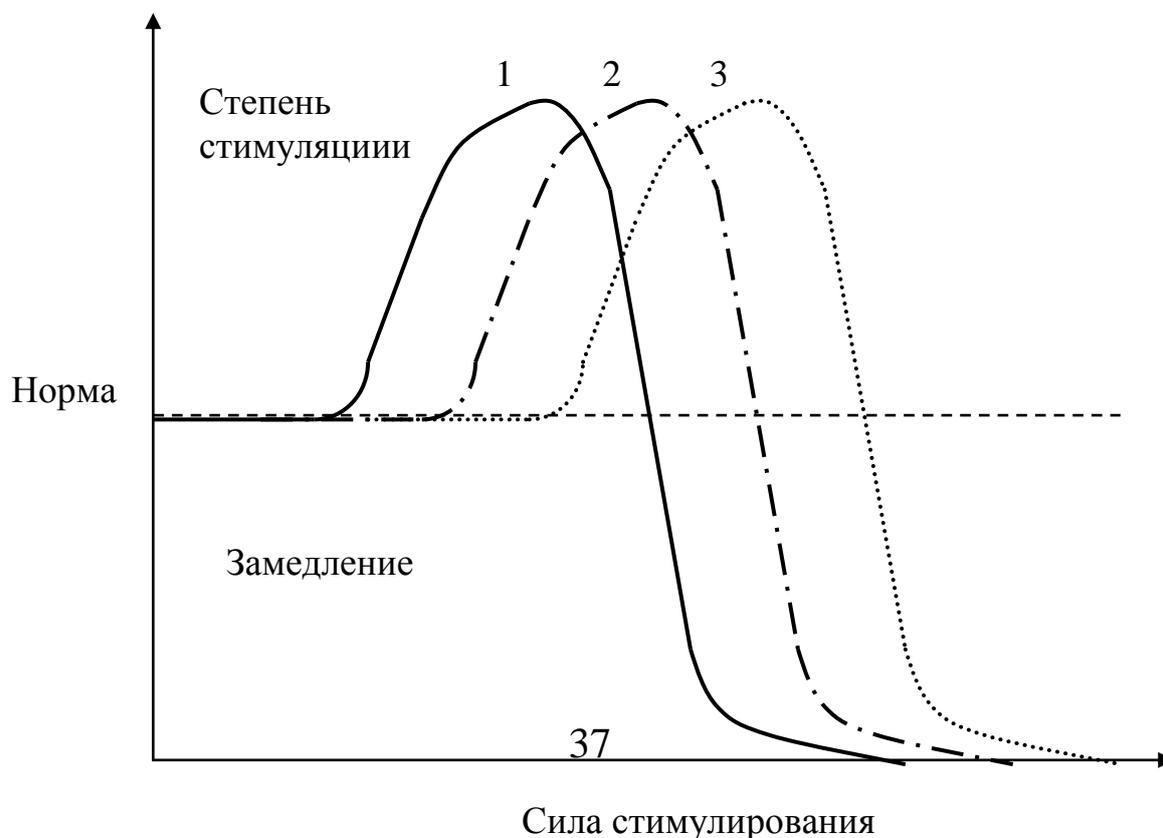


Рис. 8. Схематическая интерпретация закона Арндта – Шульца, взаимодействие лазерного луча и биоткани /7/

В дальнейшем при увеличении дозы (Q) отмечается повышение температуры тканей, что до уровня в 40°C рассматривается как зона биостимуляции. Если допустить нагрев ткани более 40°C , начинается денатурация белка и изменение липидов, которые на первых порах могут быть обратимыми и играть положительную роль в развитии конечных адаптационных процессов. При температуре свыше 55°C наблюдается необратимая дегенерация, а свыше 63°C – коагуляция белка.

Эти явления могут наблюдаться при высокоэнергетическом воздействии, применяемом в отдельных видах медицинской практики (онкология и другие), и не имеют никакого отношения к низкоинтенсивным лазерным аппаратам. В физиотерапевтической практике лазерной терапии используется только тот участок кривой от конца зоны нечувствительности Арндта – Шульца, который соответствует состоянию биостимуляции, а также самый начальный участок зоны обратимой стимулирующей биодепрессии, на котором не может быть необратимых изменений. Реакцию системы “лазер - биоткань” определяют именно технические параметры. Для каждого вида лазеров кривые Арндта – Шульца будут отличаться от других. Однако не представляется возможным определить конкретные кривые для каждого типа лазера, поэтому рассматриваемые графики носят качественный, но не количественный характер.

Длительность проведения процедуры квантовой терапии может быть определена с учетом “терапевтического коридора”. Это тот диапазон значений, в котором меньший уровень воздействия может дать слабо выраженный эффект биостимуляции или слишком медленный рост эффекта. В то же время больший уровень нежелателен, поскольку приводит к необратимой биодепрессии.

4.3 Взаимодействие лазерного излучения с биологическими тканями

Для точного моделирования процесса воздействия лазерного излучения необходимо учитывать различные особенности биологического объекта и свойства облучаемых биотканей (рис. 9) /8/.

Проникающее в ткань лазерное излучение подвергается многократному рассеиванию, поглощению различными биологическими структурами и частичному преобразованию во вторичное излучение. При воздействии лазерного монохроматического потока с длиной волны λ определяются спектральные коэффициенты отражения $\rho(\lambda)$, пропускания $\tau(\lambda)$ и поглощения $\alpha(\lambda)$.



Рис. 9. Модель взаимодействия лазерного излучения с биологическими тканями человека /8/

Данные коэффициенты качественно и количественно характеризуют в целом оптические свойства биоткани при ее конечной толщине и других характеризующих ее параметрах на момент времени измерения (степень пигментации, характеристика

кровообращения и т.д.). Аппараты низкоинтенсивной лазерной терапии отличаются низким уровнем интенсивности лазерного воздействия (от 0,01 до 1 Дж/см²), которое не влияет на оптические свойства биотканей.

Прохождение низкоинтенсивного лазерного излучения сквозь различные слои биоткани человека неодинаково. Глубина проникновения оптического излучения различных длин волн через слои кожи человека представлена на рис. 10 /6/. При лазеротерапии внутренних органов используется ближнее инфракрасное излучение порядка 0,74 – 3,0 мкм, так как оно обладает большим коэффициентом пропускания в биотканях.

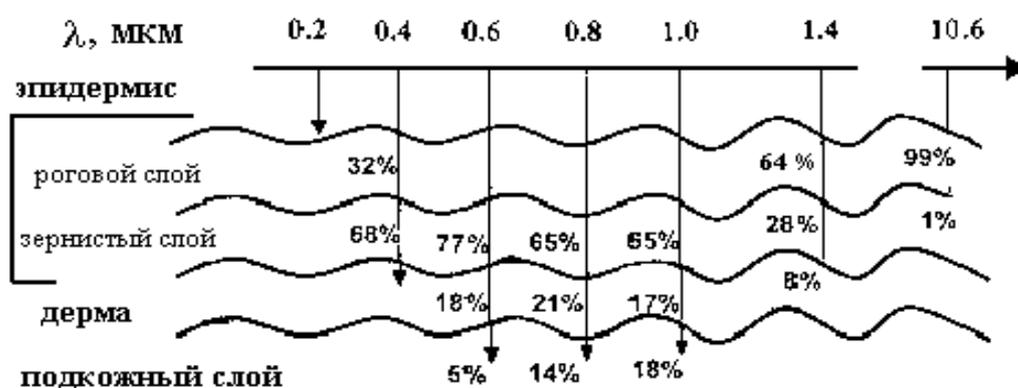


Рис. 10. Глубина проникновения лазерного излучения через слои кожи /6/

Одним из методов контроля поглощаемой дозы является учет коэффициента отражения от биоткани, т.е. биофотометрический метод контроля, который базируется на совокупности двух признаков: первый – дозовое лазерное воздействие и одномоментная оценка; второй – коррекция его эффективности по оптическим параметрам биообъекта (коэффициент отражения, поглощения, пропускания) в реальном масштабе времени на принципах обратной связи. Для этого используется варьирование параметров настройки технических средств воздействия (см. рис. 9), что обеспечивает точность, воспроизводимость и высокую адекватность диагностических и лечебных методов.

Отраженный поток лазерного излучения отличается от падающего величиной и направлением, в ряде случаев изменением состояния и

степени поляризации, а иногда и спектрального состава. Спектральный коэффициент отражения меняется с изменением длины волны падающего излучения, а все биологические ткани отражают в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра селективно, т.е. в определенном диапазоне длин волн.

Встроенные фоторегистраторы аппаратов лазерной терапии используется для определения индивидуальной дозы облучения пациента за счет учета изменений соотношения поглощения и отражения у разных пациентов или у одного и того же больного в ходе лазерной терапии. Динамика изменения оптических параметров кожного покрова у одного и того же человека в различных точках имеет индивидуальный характер в зависимости от падающего излучения, топографо-анатомического участка, пола, возраста и цвета кожи.

Ближнее ИК-излучение поглощается в основном в дерме, но некоторая часть (почти 30 %), как уже отмечалось, проникает на глубину до 40 мм, достигая подкожного жирового слоя и расположенных под ним органов. Поэтому, используя ИК-излучение различного диапазона, можно регулировать глубину проникновения и достигать нужного лечебного результата.

Однако инфракрасное излучение, оказывая определенное стимулирующее действие на организм, повышает температуру тех слоев кожи, в которые оно проникает. Поглощенная энергия света превращается в тепло, вызывая в облученном объеме локальное повышение температуры. Так как при НИЛИ не происходит фазовых переходов, то температура повышается пропорционально плотности энергии. Часть тепла отводится в зависимости от температурного градиента путем теплопередачи в более холодный окружающий участок. Из-за этого ограничивается максимально достижимая температура облучаемого участка при данной интенсивности излучения, то есть с определенной интенсивностью облучения связана определенная максимальная температура.

Так как часть энергии транспортируется в соседние области, то нагревается не только облученный объем, но и окружающие его участки. Тепло отводится от облученной ткани так же и локальным кровотоком *in vivo*. Термические свойства живой ткани определяются тремя явлениями:

- теплопроводность;
- накопление тепла;
- отвод тепла сосудистой системой.

Поэтому для контроля поглощаемой мощности необходимо учитывать не только оптические, но и теплофизические свойства биотканей с целью поддержания заданной интенсивности воздействия на подвергаемые лазеротерапии ткани путем дополнительной регистрации затраченной энергии на локальный нагрев эпидермиса (рис. 11) /8/. Эпидермис покрывает поверхность кожи и является пограничной тканью с выраженными барьерными функциями, причем рельеф и толщина эпидермиса различны у разных людей и на разных участках тела. В эпидермисе отсутствуют сплетения кровеносных сосудов, поэтому при исследовании тепловых процессов в этом слое отводом тепла, осуществляемым сосудистой системой, можно пренебречь.

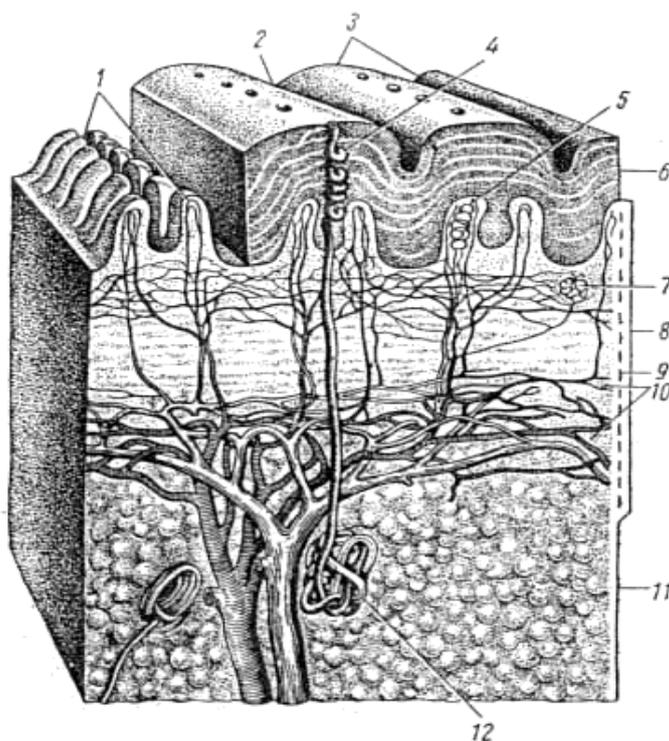


Рис. 11. Структурное строение кожи:

- 1 – сосочки дермы кожи; 2 – бороздка кожи;
- 3 – тактильные валики; 4 – выводной проток потовой железы;
- 5 – чувствительное (тактильное) тельце; 6 – эпидермис;
- 7 – сосудистые и нервные подсосочковые сети;
- 8 – соединительнотканная основа кожи; 9 – tunica propria corii;
- 10 – сосудистая сеть; 11 – подкожная клетчатка;
- 12 – потовая железа

Для биоткани значения коэффициента теплопроводности составляют 0,3 – 0,5 Вт/(м·°С) в зависимости от содержания воды, а способность ткани принимать и накапливать тепло описывается через удельную теплоемкость. Например, удельная теплоемкость жира составляет 1930 Дж/(кг·°С). Таким образом, при дозиметрии НИЛИ внутренних органов необходимо учитывать количество введенной энергии (поглощенной дозы) не только по коэффициенту отражения, а также по количеству энергии, расходуемой на нагрев верхнего слоя кожи – эпидермиса. Локальный нагрев всегда присутствует в большей или меньшей степени в зависимости от теплофизических свойств биоткани и, в первую очередь, от ее теплопроводности.

Интересными представляются исследования воздействия низкоинтенсивного лазерного излучения на растения. На схематичном изображении листа в поперечном разрезе (рис. 12) хорошо видно, что с обеих сторон он также покрыт эпидермисом /9/. Поэтому, как и в случае с биологическим объектом, здесь возможна коррекция эффективности лазерной терапии по оптическим параметрам биообъекта и его теплофизическим свойствам.

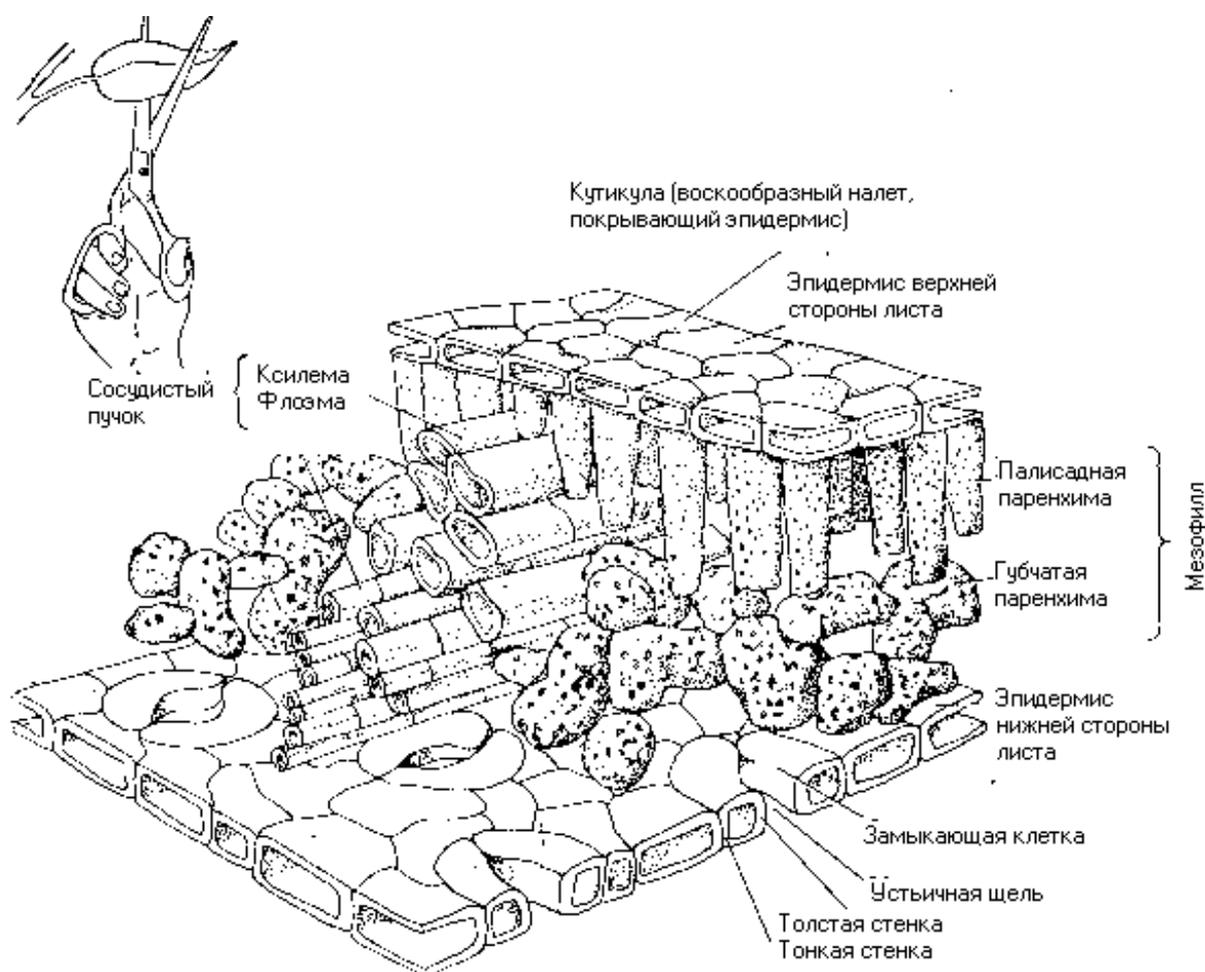


Рис. 12. Схематическое изображение листа в поперечном разрезе /9/

4.4 Алгоритм получения и обработки информации при низкоинтенсивной лазерной терапии внутренних органов

Алгоритм получения и обработки информации при реализации метода контроля поглощаемой в эпидермисе мощности излучения при НИЛТ внутренних органов заключается в следующем /8/:

- регистрируется отраженная часть лазерного излучения от биоткани (определяется коэффициент отражения кожного покрова $\rho(\lambda)$);
- рассчитывается отраженная средняя мощность, определяемая из выражения

$$P_{отр} = \rho(\lambda) \cdot P_{пад},$$

где $P_{пад}$ – падающая средняя мощность лазерного излучения, задаваемая при воздействии;

- во время процедуры низкоинтенсивной лазерной терапии внутренних органов после завершения переходных процессов производится измерение значений температур (Θ_1 и Θ_2) локального нагрева эпидермиса в двух точках, лежащих вне светового пятна на одном радиус-векторе и определенном расстоянии друг от друга, причем

Θ_1 – температура места с большим нагревом, расположенного ближе к излучателю, а Θ_2 – температура места с меньшим нагревом, т.е. расположенного дальше от излучателя;

- методом численного интегрирования вычисляется градиент температуры на границе светового пятна $\left(\frac{\partial \Theta}{\partial r}\right)_R$ из уравнения теплового баланса эпидермиса в установившемся режиме:

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial r} + \frac{k_g + k_m}{k_{mn} \cdot h} \cdot \Theta - \frac{k_g \cdot \Theta_g + k_m \cdot \Theta_m}{k_{mn} \cdot h} = 0,$$

где Θ – температура эпидермиса на расстоянии r от центра светового пятна;

k_g – коэффициент теплоотдачи “эпидермис – воздух”;

k_m – коэффициент теплоотдачи “эпидермис – внутренние слои биоткани”;

k_{mn} – коэффициент теплопроводности эпидермиса вглубь биоткани;

h – толщина эпидермиса;

Θ_s и Θ_m – температура окружающего воздуха и внутренних слоев биоткани соответственно;

– находится поглощаемая в эпидермисе мощность $P_{наг}$, расходуемая на его локальный нагрев, по следующему выражению:

$$P_{наг} = k_{mn} \cdot h \cdot 2\pi \cdot R \cdot \left(\frac{\partial \Theta}{\partial r} \right)_R,$$

где R – радиус светового пятна.

Таким образом, для определения потерь мощности лазерного излучения на локальный нагрев в эпидермисе достаточно измерить значения температуры эпидермиса в двух точках вне светового пятна (вне облучающего терминала), лежащих на одном радиус-векторе;

– рассчитывается коэффициент теплового поглощения эпидермиса ξ :

$$\xi = \frac{P_{наг}}{P_{над} - P_{отр}};$$

– вычисляется коэффициент поглощения лазерного излучения внутренними тканями κ :

$$\kappa = 1 - [\rho(\lambda) + \xi];$$

– согласно выбранным параметрам воздействия определяется падающая доза лазерной энергии $D_{над}$ из следующего выражения:

$$D_{над} = \frac{P_{над}}{S_{кв. см}} \cdot t,$$

где $S_{кв. см}$ – площадь облучаемого участка биоткани,

t – экспозиция (время воздействия);

– рассчитывается поглощенная внутренними тканями доза при их лазерной терапии:

$$D_{\text{погл}} = D_{\text{над}} \cdot \kappa = D_{\text{над}} \cdot [1 - (\rho(\lambda) + \xi)].$$

Итак, с помощью измерения коэффициента отражения лазерного излучения от биоткани и выделения части мощности, потраченной на локальный нагрев эпидермиса, учитываются не только оптические, но и теплофизические свойства эпидермиса биологического объекта, а значит, повышается точность контроля поглощенной дозы внутренними тканями при низкоинтенсивной лазерной терапии внутренних органов.

Таким образом, вследствие неоднозначной реакции биоткани на оказываемое воздействие необходимо управление параметрами этого воздействия, его коррекция.

4.5 Связь параметров биотехнических систем лазерного воздействия

Связь трех групп параметров БТС лазерного воздействия в первом приближении показана на рис. 13. Варьируя плотность мощности P (плотность энергии E), длину волны λ и длительность лазерного импульса τ , учитывая оптические свойства конкретной среды, можно получить заданный температурный профиль $\Delta T(x)$, т.е. коэффициент поглощения α . Радиус зоны лазерного воздействия R зависит при заданной плотности энергии E от теплопроводности $k_{\text{тп}}$ и радиуса луча r . Глубина зоны воздействия L определяется теплоемкостью c и коэффициентом поглощения биоткани β и меняется при изменении плотности энергии и длины волны.

Рассматривая параметры биообъекта, нетрудно заметить, что при больших коэффициентах поглощения α поглощение излучения будет происходить в тонком слое, а при малых α излучение будет проникать вглубь ткани; при больших $k_{\text{тп}}$ тепло, обусловленное лазерным излучением, будет быстрее уходить из зоны воздействия, чем при малых $k_{\text{тп}}$, и поэтому для достижения нужного нагрева требуется меньшая скважность и длительность импульсов. При большой теплоемкости c требуется соответственно больше плотности энергии E для выпаривания или дозированного прогрева заданного объема биоткани. Таким образом, оптимизируемые параметры технической системы ($E, \lambda, \tau, I(r), r$) задаются характеристиками зоны воздействия

$(\Delta T(x), R, L)$ с учетом соответствующих свойств биологической системы $(\alpha, k_{\text{тп}}, c)$. Параметры зоны воздействия, как первичный результат взаимодействия технической и биологической систем, определяются таким образом, чтобы в соответствии с принципом адекватности в ближайших к зоне тканях повреждение было минимальным.

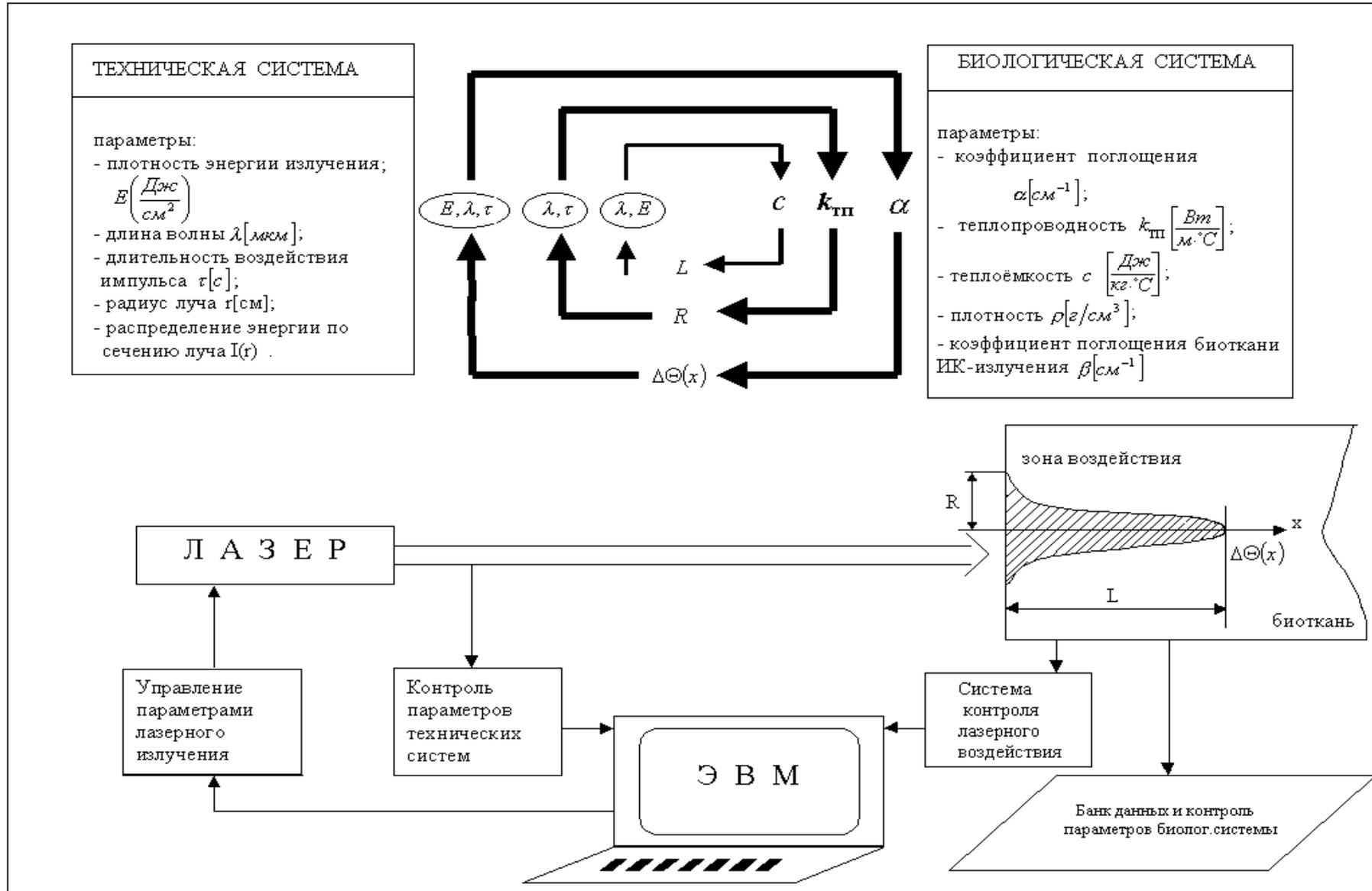


Рис. 13. Связь параметров БТС лазерного воздействия

Для эффективного управления процессом необходимо его контролировать. В настоящее время контроль за лазерным воздействием, в основном, осуществляется либо визуально врачом по появляющимся изменениям в зоне воздействия, либо в результате априорной оценки воздействия по выходной мощности используемого лазера и предварительным средним оценкам оптических свойств биотканей (срезов), либо по показаниям пациента. Такой контроль ненадежен, субъективен, неоперативен и неавтоматизирован. По сути дела, при конкретном лазерном воздействии могут проверяться только средние параметры технического средства, но нет контроля за реакцией биологического объекта на оказываемое воздействие.

Контроль воздействия может быть основан на явлении, происходящем в биоткани и сопровождающем это воздействие или являющемся непосредственным его результатом, чтобы по изменению параметров данного явления судить о ходе воздействия.

Процессы, происходящие в биообъекте при лазерном воздействии, непосредственно зависят от поглощаемой в единицу времени энергии излучения, поэтому целесообразно вести контроль за самим процессом поглощения, который сопровождается разными эффектами. Проявление их различно в зависимости от соответствия параметров лазерного излучения параметрам биоткани. Оценка изменения параметров явления от воздействующих факторов позволяет осуществить обратную связь в БТС, необходимую для оптимизации процесса воздействия.

Учитывая, что при лазерном воздействии на все типы биотканей всегда присутствует больший или меньший нагрев, в качестве примера можно рассмотреть метод, реализующий биологическое управление и основанный на регистрации неравновесного инфракрасного излучения, вызываемого лазерным облучением биоткани. Этот процесс стабилен и обусловлен только параметрами биообъекта и лазерного излучения, то есть самим процессом поглощения, а также непосредственно связан с его кинетикой. Структурная схема БТС лазерного воздействия с контролем,

используя метод импульсной фототермической радиометрии (ИФТР), представлена на рис. 14.

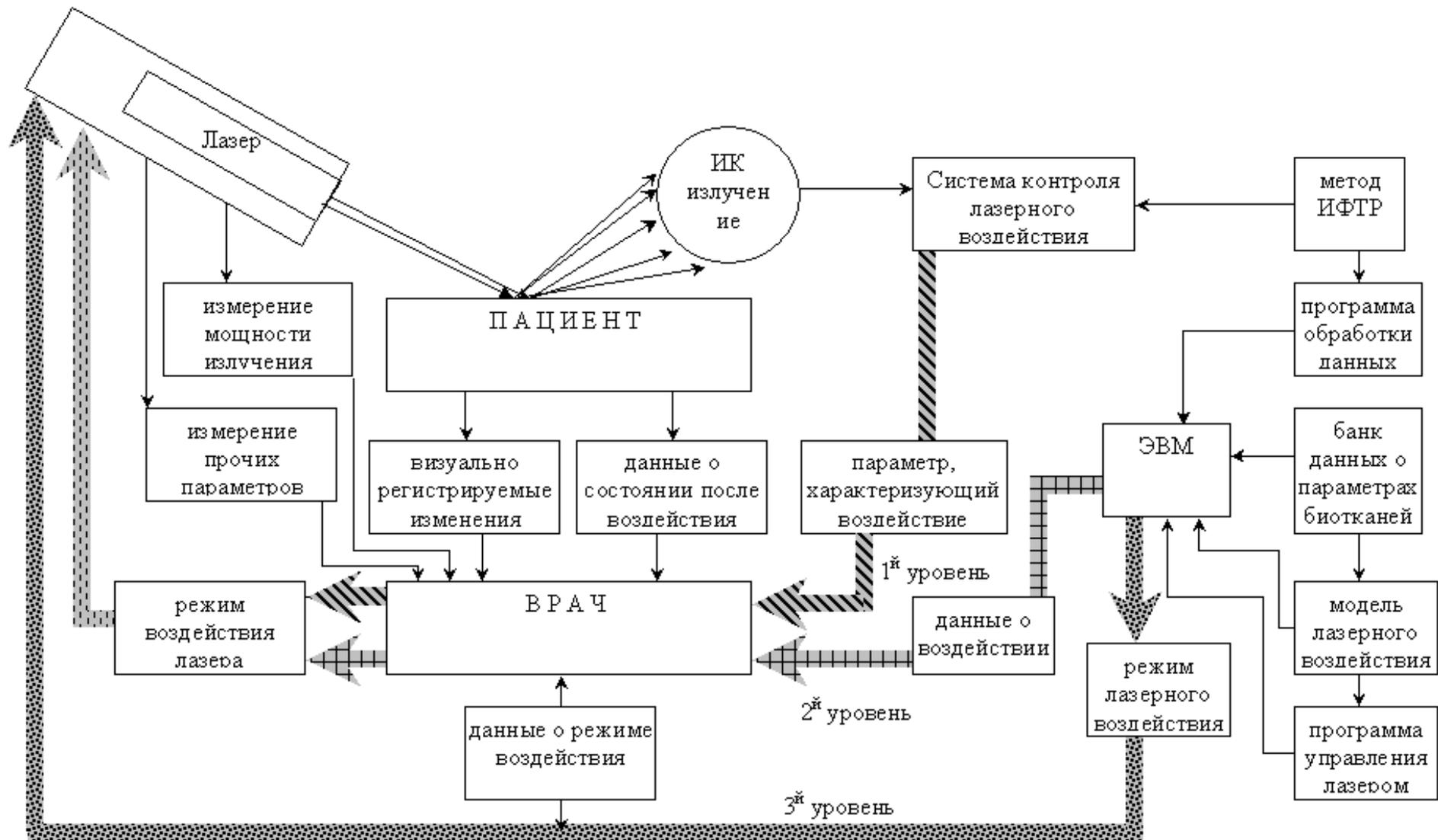


Рис. 14. БТС лазерного воздействия с контролем, использующим метод импульсной фототермической радиометрии (ИФТР)

Функциями представленной БТС являются регистрация параметров процесса нагрева, лежащего в основе системы контроля; аналого-цифровое преобразование этой информации; ввод в ЭВМ; запоминание и обработка данных, а кроме этого в соответствии с полученными данными принятие решения об изменении режима работы лазера; выработка управляющего сигнала для блоков управления генерацией и информирование врача-оператора. Работа рассматриваемых БТС лазерного воздействия делится на три этапа:

- регистрация сигнала из биообъекта;
- обработка сигнала и принятие решения;
- управление лазером.

Одной из возможных причин, приводящих к неоднозначности ответных реакций больных, негативному влиянию или неэффективности лазерной терапии, является игнорирование влияния биоритмов внутриклеточных процессов и организма пациента в целом и динамики их изменения во время сеанса на результат лечебного воздействия. Методы контроля лазерной процедуры, основанные на биоуправлении, осуществляют воздействие лазерным излучением в соответствии с биоритмологическими показателями организма. Теперь, наряду с медикаментами и физиотерапевтическими методами, во врачебную практику входит третий важнейший фактор лечения – время. Это направление получило официальное название – *хронотерапия*.

Биоуправление, основанное на хронобиологическом подходе, позволяет прогнозировать ответную реакцию биосистемы на дозируемое воздействие благодаря автоматическому учету исходного состояния и фазы периода биоритмов. Если физиологическое воздействие наносится только в благоприятную для положительной ответной реакции фазу биоритмов, то это исключает расшатывание гомеостаза в обе стороны, обеспечивая коррекцию регулируемых переменных только в сторону нормализации.

Без учета фаз энергообеспечения ответных реакций лечебный эффект или побочная реакция зависят от суммирования положительных и отрицательных ответов на лазерное воздействие на клеточном уровне. Причем регуляция воздействия лишь по отклонению одного регистрируемого параметра (например, частоты пульса) не позволяет устранить патологическую форму гомеостаза, и компенсационные изменения в других органах и системах не

гарантируют отсутствия осложнений и побочных эффектов, появляющихся как и при обычной физиотерапии.

4.6 Теоретические основы квантовой медицины

Квантовая терапия возникла в середине 80-х годов прошлого века и представляет собой полифакторное (сочетанное), одновременное воздействие на биологические структуры объекта (пациента, животного, растения) импульсного инфракрасного лазерного излучения, пульсирующего широкополосного инфракрасного излучения, пульсирующего красного излучения и постоянного магнитного поля /7/.

Основным лечебным фактором квантовой терапии является *импульсное инфракрасное лазерное излучение* полупроводникового арсенид-галлиевого лазерного диода (длина волны 890 нм) /10/, которое, обладая монохроматичностью (узкополосностью), пространственной и временной когерентностью и поляризованностью, оказывает благодаря этим свойствам мощное стимулирующее воздействие на кровообращение, мембранный клеточный обмен веществ, гармонизирует гормональные факторы обмена веществ и оказывает другое положительное влияние. Как уже отмечалось, глубина проникновения низкоинтенсивного лазерного излучения в биообъект зависит, главным образом, от длины волны (рис. 15), поэтому для ближнего инфракрасного диапазона спектра биологические ткани обладают наибольшей оптической прозрачностью.



Рис. 15. Глубина относительного проникновения излучения в биоткани в зависимости от длины световой волны

Энергия фотонов инфракрасной области колеблется в пределах от 1 до 1,5 эВ, и ее недостаточно, чтобы повредить сильные межмолекулярные связи биополимеров, энергия межатомных связей которых составляет 2,06 – 12,6 эВ. Но в то же время этой энергии достаточно для стимуляции колебательных процессов в молекулах вещества и активации электронного возбуждения атомов. При этом световая энергия почти полностью затрачивается на фотофизические реакции, то есть превращается в тепловую. Температурный градиент, вызываемый излучением аппарата, достаточно мал (менее одного градуса), а главное, он значительно меньше значений, способных вызвать необратимые изменения клеточных структур. Таким образом, основным эффектом инфракрасного излучения является слабое тепловое воздействие при большой глубине проникновения, а терапевтический эффект связан с активацией процесса микроциркуляции в биоткани, активизацией молекул, физических и биохимических процессов.

Пульсирующее широкополосное инфракрасное излучение полупроводниковых светодиодов обладает меньшей, чем лазерное, биологической эффективностью вследствие большей спектральной широты, некогерентности и неполяризованности. Оно проникает на большую глубину и оказывает гармонизирующее воздействие на тонус центральной и вегетативной нервной системы. Диапазон волн составляет 800 – 900 нм, а энергия квантов здесь выше, чем у ИК-излучения, и достигает 1,6 эВ. Однако некогерентный неполяризованный широкополосный характер такого излучения также обеспечивает полную безопасность воздействия на биоткани, содействуя более глубокому проникновению лазерного излучения.

Диапазон длин волн *пульсирующего широкополосного красного излучения*, видимого глазом, составляет 600 – 700 нм и имеет максимальную энергию фотона около 2 эВ. Однако этой энергии также недостаточно для возникновения деструктивных процессов в тканях. Проникая на незначительную глубину, это излучение, тем не менее, оказывает благоприятное воздействие, уменьшая интенсивность воспалительных процессов в коже и подкожной клетчатке, особенно в зонах организма, имеющих большое

количество рыхлой соединительной ткани. Кроме этого, пульсирующий красный свет, визуализируя работу излучателя, является мощным психотерапевтическим фактором для пациента. Следует отметить, что общетонизирующее действие видимого красного света давно уже стало научным фактом.

В организме постоянно идут процессы электролитической диссоциации молекул, и параллельно с ними идут процессы их рекомбинации (восстановления). Фотоэлектрический эффект, при котором наведенная ЭДС достигает величин, способствующих диссоциации, усиливается постоянным магнитным полем, позволяющим на определенное время удерживать молекулы в диссоциированном состоянии. Постоянное магнитное поле поворачивает оси молекулярных магнитных диполей, увеличивая внутреннюю энергию молекул. Оно так же позволяет удерживать ионизированные молекулы тканей в диссоциированном состоянии, что повышает эффективность воздействия других лечебных факторов квантовой терапии на молекулярном и клеточном уровне. Протекание в сосудах потока ионизированных молекул и клеток крови в магнитном поле вызывает их прижатие к стенкам и завихрение (турбулентность) потока, что усиливает интенсивность насыщения тканей кислородом и вывод шлаков.

Таким образом, под влиянием магнитного поля увеличивается проникновение инфракрасного излучения вглубь ткани, а также усиливаются турбулентные процессы в циркулирующих жидкостях. Индукция постоянного магнитного поля магнито-инфракрасного лазерного аппарата, равная 35 ± 10 мТл, достаточна для переориентировки молекул-диполей и части ионизированных в жидких средах.

Теоретически обосновано и практически доказано усиление эффекта биостимуляции при сочетании действия составляющих квантовой терапии с указанными выше физическими характеристиками излучений магнито-инфракрасного лазерного аппарата /7/. Все вышеперечисленные лечебные факторы, действуя одновременно (синергично), взаимно усиливают друг друга и тем самым обуславливают уникальный физиотерапевтический, лечебный, энергогармонизирующий и профилактический эффекты полифакторного воздействия.

4.7 Основы биоуправляемой лазерной хронотерапии

Идеи о периодичности процессов в человеческом организме нашли яркое отражение в учении восточной медицины с её представлениями о суточном периоде циркуляции в организме “жизненной энергии” и связанных с этим различных максимумах и минимумах функционирования органов и систем. Подтверждается это измерением физиологических показателей, проведенным в различное время и дающим совершенно разные результаты, что может служить причиной неточной диагностики. В каждый момент времени организм представляет собой различную биохимическую и физиологическую сущность, и терапевтическое воздействие в зависимости от времени его нанесения может обладать совершенно различным эффектом.

Хронобиологические исследования доказывают различие не только интенсивности, но и направленности (знака) ответной реакции живого субстрата на одно и то же внешнее физическое воздействие в зависимости от исходного состояния или, иначе, фазы биоритма клетки, ткани, органа и организма. Знание периодов, когда такое воздействие наиболее эффективно, может дать возможность добиться желаемого результата применением меньших доз лечебных воздействий, с меньшим риском развития побочных эффектов и осложнений /11, 12/.

Естественные колебания физических полей стали «языком» взаимодействия между живыми клетками и другими биосистемами. Именно поэтому квантовая терапия является биологически адекватным способом коррекции нарушенных связей в организме человека при различных заболеваниях. В частности, воздействие на изолированную клетку только в фазы увеличения энергообеспечения (усиления диффузии кислорода, усиления транспорта энергетических субстратов и увеличения активности ферментов энергетического обмена) приводит к устойчивому повышению содержания белка в клетке и усилению биосинтеза. Наоборот, воздействие в фазы снижения энергетики клетки усиливает преобладание деструктивных процессов.

Принципиально важно, что эффективное биоуправление достигается лишь при *многочастотном воздействии* в соответствии с иерархией периодов биоритмов энергетики клетки. Для этих биоритмов характерны варьирующиеся периоды, и поэтому они не могут имитироваться гармоническими колебаниями. По этой причине

использование в физиотерапии фиксированных частот не всегда может гарантировать адекватный «отклик» организма в виде однозначных ответных реакций. Указанные в методических руководствах оптимальные частоты для конкретных болезней или проявление отдельных эффектов не подтверждаются на практике. Различие часто наблюдается не за счет отличия используемых частот, а за счет изменения при этом средней плотности мощности. Все биоритмы имеют флюктуирующий период, а направленность ответных реакций зависит от статистики попадания в разные фазы их энергообеспечения и исходного состояния. Без автоматического учета биоритмов пациента в режиме биоуправления прогноз и гарантия лечебного эффекта невозможны. Действительно оптимальными могут быть воздействия с иерархией биоритмов самого пациента.

В клинической практике широкое распространение нашли показатели функций сердечно-сосудистой и дыхательной систем, т.к. ритмы пульса и дыхания пациента фактически содержат все другие ритмы организма и адекватно отражают текущее состояние организма и его адаптацию к текущей временной организации внешней среды – фазы околосуточных, лунных, сезонных и многолетних ритмов организма. Каждый отрицательный импульс напряжения, снимаемый с датчика пульса, представляющего собой оптронную пару, находящуюся в контакте с одним из пальцев пациента, соответствует одному сердечному сокращению пациента (рис. 16, а) /13/. Амплитуда электрического сигнала (рис. 16, б) с датчика дыхания, помещенного на верхней губе пациента, увеличивается при вдохе и уменьшается при выдохе. Суммарное выходное напряжение (рис. 16, в) будет иметь несколько составляющих: U_1 – постоянная составляющая выходного напряжения; U_2 – составляющая, пропорциональная изменениям объема грудной клетки, вызванным дыхательной деятельностью пациента; U_3 – составляющая, обусловленная сердечной деятельностью, которая снимается не относительно средней точки, а относительно минуса источника питания и сдвигается, тем самым, в область одного знака.

Преимущества биоуправления достигаются еще и за счет того, что по сигналу пульса вводится задержка, необходимая для учета скорости распространения пульсовой волны и венозного кровотока под действием дыхательного подсоса в соответствии с расстоянием от датчика до места физиотерапевтического воздействия. Необходимо

учитывать различие путей распространения пульсовой волны от сердца до места расположения датчика пульса и места патологии. Датчик пульса (чаще это фотодатчик из свето- и фотодиода или оптронная пара как наиболее помехоустойчивые по сравнению с другими видами датчиков) может располагаться на мочке уха или на пальце руки /11, 12, 13/.

Скорость пульсовой волны в сосудах эластического типа составляет 5 – 6 м/с, мышечного типа – 7 – 8 м/с. При патологии и с возрастом в результате склероза эта скорость возрастает. Однако практические измерения запаздывания пульса показывают, что, располагая датчик пульса на пальце руки, введение задержки на 0,1 с необходимо только при обработке тканей голени и стопы ноги. В этом случае у всех пациентов усиление воздействия приходится в пределах фазы увеличения кровенаполнения ткани.

Для датчика дыхания введение задержки из-за большой продолжительности фазы вдоха не требуется.

В начале сеанса происходит перестройка ритмов кровотока в месте патологии, и вскоре автоматически обеспечивается необходимая синхронизация вне зависимости от характера дыхания и частоты пульса.

Само воздействие осуществляется синхронно с ритмом пульса и дыхания, так как в дальнейшем выходное напряжение с измерительных датчиков воздействует на стационарный сигнал, называемый носителем, то есть осуществляется *модуляция*.

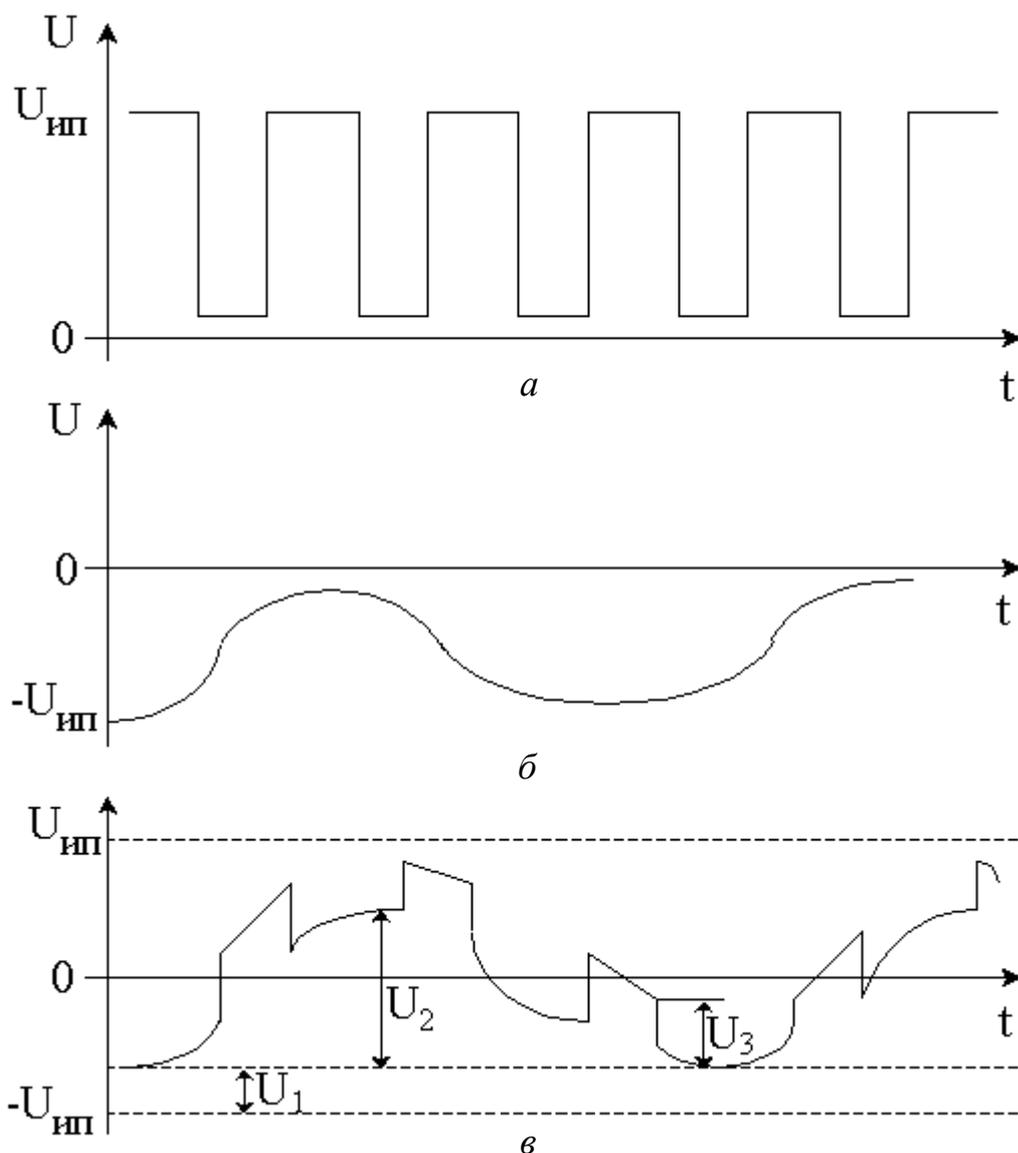


Рис. 16. Временные диаграммы биоуправляющих сигналов /13/

На уровне организма наиболее благоприятными являются фазы ритмов увеличения кровенаполнения ткани, когда избирательно открываются капилляры вблизи клеток с повышенной возбудимостью, и усиливается энергетика их ансамблей. Именно несущая частота тремора (т.е. произвольного ритмического колебания мышечных тканей), находящаяся в диапазоне 7 – 13 Гц, модулируется сигналами с датчиков пульса и дыхания, что позволяет автоматически синхронизировать интенсивность лечебного воздействия с биоритмами организма.

Модуляцию можно трактовать как умножение модулируемой функции (носителя) на величину $1+MU(t)$, где $U(t)$ – модулирующая функция или суммарное напряжение с измерительных датчиков, M – глубина модуляции ($0 \leq M \leq 1$), а амплитуда носителя при этом

будет изменяться по закону изменения модулирующего напряжения. Выражение для импульсного сигнала, модулированного по амплитуде синусоидальным напряжением, имеет следующий вид:

$$u = U_m \sum_{i=1}^{\infty} \delta(t - iT) (1 + M \cos \omega t),$$

где U_m – амплитуда носителя,

$\delta(t - iT)$ – дельта-функция, описывающая последовательность импульсов;

i – номер импульса;

$T = \frac{1}{F}$ – промежуток времени между соседними импульсами,

где F – несущая частота тремора, плавно меняющаяся во время сеанса;

$$\omega = 2\pi f,$$

где f – модулирующая частота выходного напряжения измерительных датчиков.

Коэффициент (глубина) модуляции M равен отношению изменения амплитуды ΔU колебания носителя при модуляции последнего к ее значению U в отсутствие модуляции:

$$M = \frac{\Delta U}{U}.$$

Максимальное изменение амплитуды не должно превышать ее значения, и поэтому максимальная величина глубины модуляции $M = 1$. При отсутствии модуляции $M = 0$. Амплитуда модулированного сигнала будет обусловлена глубиной модуляции, и в зависимости от характера заболевания, т.е. органа, подвергающегося облучению, выбирается необходимый режим работы.

Каждый импульс носителя заполняется высокочастотным сигналом с частотой следования импульсов, равной 22,5 кГц, которая соответствует максимуму образования синглетного кислорода и обеспечивает более глубокое проникновение в ткани излучения.

Результирующая характеристика модулированного выходного напряжения показана на рис. 17, где T_1 – период следования импульсов частотой 22,5 кГц; τ – длительность высокочастотных импульсов;

T_2 – плавно меняющийся период следования импульсов частотой 7 – 13 Гц.

Так как мощность импульсного лазерного излучения пропорциональна модулированному выходному напряжению, то этот же рисунок хорошо иллюстрирует процедуру лазерного воздействия во время сеанса физиотерапии. Автоматическая синхронизация квантового воздействия с фазами текущих ритмов увеличения кровенаполнения ткани позволяет индивидуально оптимизировать квантовую терапию, основываясь на глубине модуляции по сигналам пульса, дыхания и тремора.

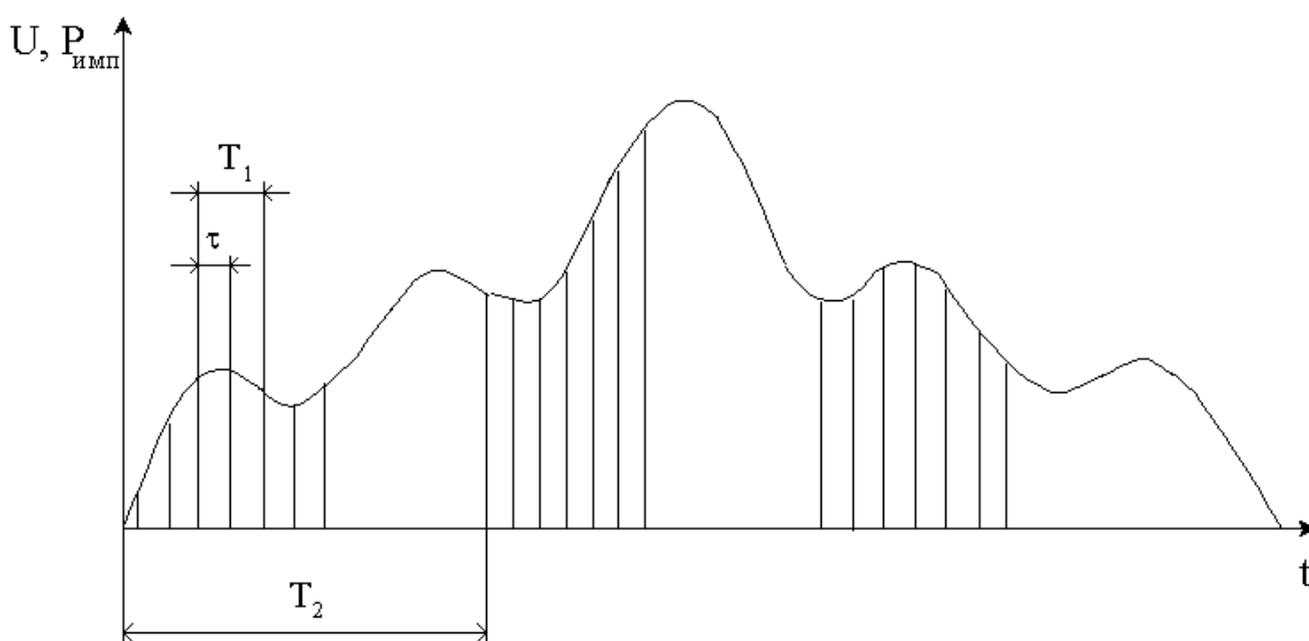


Рис. 17. Амплитудно-модулированный сигнал

Для оценки эффективности лечения кроме клинических показателей и хронобиологических алгоритмов функций сердечно-сосудистой и дыхательной систем используются еще и реографические, микроплетизмографические и флоуметрические характеристики кровотока и микроциркуляции, иммунологические и биохимические показатели:

- 1) величина амплитуды колебаний внутриклеточных микроструктур в клетках эпителия щеки человека;
- 2) нормализация активности ферментов крови;
- 3) нормализация иммунитета по показаниям дифференциальной термометрии;

- 4) нормализация спектра ритмов микроциркуляции крови при лазерной доплеровской флоуметрии;
- 5) нормализация вегетативного статуса;
- 6) нормализация дисперсии отношения частоты пульса к частоте дыхания.

Режим биоуправления значительно расширяет терапевтический диапазон интенсивностей квантовой терапии; более слабые по средней плотности мощности воздействия становятся эффективнее, а более сильные еще не вызывают передозировки. Оптимальные интенсивности смещаются в ту или иную сторону для разных больных и даже для одного и того же больного в разное время и в разные дни. Режим биоуправления снижает требования к индивидуальному подбору параметров лечения и практически исключает побочные эффекты и передозировку.

Общим в режиме биоуправляемой квантовой хронотерапии для всех изученных заболеваний явилось увеличение интегральной целостности организма больного и восстановление гармонии его биоритмов. Для увеличения стабильности лечебного эффекта необходим учет не только их спектра с отражением в сигналах тремора, пульса и дыхания, но и более медленных биоритмов организма больного. Ритм перераспределения кровотока и тонуса мышц с периодами около 5 минут нормализуется благодаря эмпирически найденным оптимальным продолжительностям сеанса и времени обработки одного поля. Околочасовые ритмы синтеза белка и функциональных систем организма учитываются исключением функциональных нагрузок в течение 30 – 60 минут после сеанса квантовой терапии. Для усвоения организмом лечебного воздействия и стабилизации положительных изменений в микроциркуляции и трофике ткани необходим пассивный отдых больного. Околосуточный ритм учитывается при ежедневном назначении сеансов, причем лечебное воздействие по времени суток не должно совпадать с максимумом активности органа, который подвергается лечебному воздействию.

Для увеличения эффективности лечения большинства заболеваний необходимо использовать разные соотношения глубин амплитудной (или частотной) модуляции сигналов с датчиков пульса, дыхания и тремора, потому что квантовая терапия не сводится к простому суммированию действия лазера в инфракрасном, красном диапазонах

и магнитного поля. Неаддитивность эффекта доказывается снижением эффективности лечения при последовательном, а не одновременном воздействии теми же тремя видами лечебных факторов с теми же параметрами, подобно тому, как вкусовые ощущения от кусочка торта нельзя заменить, если последовательно съесть кусок масла, ложку сахара и кусок теста.

Квантовый характер магнитного поля при использовании постоянного магнита объясняется магнитной индукцией, вызываемой движением крови, содержащей железо в эритроцитах. Распространение и поглощение фотонов квантового излучения зависит от пространственной организации обрабатываемой ткани и клеток. Однако главной для биологического эффекта является временная организация перемежающихся функциональных единиц клеток ткани, обладающих в момент обработки повышенной возбудимостью и наибольшей чувствительностью к квантовому воздействию. Синхронизация квантового воздействия с увеличением кровенаполнения ткани и усилением энергетики клеток с повышенной чувствительностью увеличивает вероятность положительных реакций.

Одним из главных достоинств метода является использование в нем таймера не с физическими, а с биологическими индивидуальными эталонами времени, экспозицией. Скорость биологических процессов индивидуальна, а эмоциональный фактор и соответственно гормональный фон также способны резко изменять скорость нейропсихических, соматических процессов организма и структурно-метаболических и функциональных процессов на тканевом, клеточном и субклеточном уровнях.

Кроме этого специальными исследованиями было доказано, что при биоуправляемой хронотерапии возникает тканевая память, когда многократное сочетание вдоха пациента с усилением лазерного воздействия и реакций капиллярной сети на это воздействие через несколько сеансов приводит к выработке временной связи по типу условного рефлекса. В результате после сеансов хронотерапии само дыхание пациента поддерживает нормализованный в результате спектр ритмов кровотока. Стабильность лечебного эффекта показала проведенная проверка, которая зафиксировала сохранение тканевой памяти после 10 сеансов лазерной хронотерапии в течение 2-3 месяцев /12/.

Учесть индивидуальные различия и иерархию биоритмов можно только в режиме интерактивной хронодиагностики и биоуправляемой хронотерапии. Биологическим эталоном времени у человека является межпульсовый интервал. Использование его вместо отсчета в секундах или минутах позволяет обеспечить одинаковые условия воздействия по длительности и, благодаря образованию тканевой памяти, увеличить стабильность лечебного эффекта. Использование биологического таймера ускоряет образование тканевой памяти при биоуправляемой квантовой хронотерапии. В этом случае выработка условного рефлекса реакции капиллярной сети на вдох пациента, при котором усиливается квантовое воздействие, ускоряется, а прочность рефлекса увеличивается.

Таким образом, по сравнению с традиционными методами биоуправляемая хронофизиотерапия, в том числе и лазерная, обладает следующими преимуществами /12/:

1) системный характер лечения – устранение не только следствий, но и самой причины болезни благодаря иммунокоррекции, нормализации ритмов кровотока, согласованию ритмов регионального и центрального кровотока и другим положительным эффектам;

2) отсутствие вредных или побочных эффектов благодаря учету индивидуальных биоритмологических особенностей пациента, синхронизации воздействия с нужными фазами всего спектра ритмов кровотока и исключению частот воздействия, отрицательно влияющих на клетки и ткани;

3) стабильность лечебного эффекта благодаря образованию тканевой памяти по типу условного рефлекса в результате сочетания дыхания пациента в виде условного сигнала и реакции капиллярной сети как трофического подкрепления при усилении в моменты вдоха физиотерапевтического воздействия;

4) отсутствие адаптации ткани к физиотерапевтическому воздействию благодаря неравномерности пульса и дыхания пациента;

5) пространственная избирательность воздействия в месте патологии благодаря интерференции разных близких частот суммарного выходного сигнала;

6) автоматическое индивидуальное дозирование лечебного воздействия благодаря учету фаз всего спектра биоритмов пациента и использованию биологического таймера, единицей времени которого является не секунда или минута, а межпульсовый интервал;

7) активное участие пациента благодаря условиям психотерапии и аутотренинга;

8) адекватность формы суммарного воздействия восстановлению оптимальной микроциркуляции в месте патологии за счет регуляции соотношения глубин модуляции по пульсу и дыханию соответственно нарушениям в артериальной и венозной частях капиллярного русла;

9) гармонизация всех факторов местного кровотока благодаря согласованию величин сигналов в регуляции венозного возврата и функции "периферических сердец" мышечного тремора (частота 10 ± 3 Гц обеспечивает эффект биохимической стимуляции);

10) отсутствие нарушений реологических свойств форменных элементов крови благодаря синхронизации воздействия со всем спектром ритмов кровотока;

11) усиление скорости внутриклеточной и клеточной регенерации с помощью учета биофизических механизмов взаимодействия ритмов функциональной нагрузки с ритмами энергетики и трофики, изученных на уровне клетки, ткани и органа;

12) повышение качества регенерации без грубых нарушений соотношения разных видов клеток благодаря восстановлению нормального спектра кровотока;

13) замедление старения за счет поддержания гармонии ритмов организма и нормализации в отдельных местных очагах патологии;

14) возможность оперативного контроля состояния пациента и хронодиагностики до, во время и после сеанса физиотерапии;

15) возможность адаптивной индивидуальной коррекции и оптимизации параметров воздействия в ходе сеанса и курса лечения;

16) возможность гармоничного сочетания разных видов физиотерапии между собой и с другими видами воздействия на организм пациента.

Кроме лазерной терапии биоуправляемая хронофизиотерапия применима для электротерапии, КВЧ-терапии, ультразвуковой терапии, магнитотерапии, а также для свето- и цветотерапии, гидро- и пневмомеханотерапии. Здесь добавляется еще несколько преимуществ данного метода воздействия на пациента /12/:

17) усиление и увеличение глубин введения лекарственных веществ благодаря согласованию электро-, ультразвукового и других воздействия с ритмами кровотока;

18) увеличение эффективности разных видов массажа и воздействий на биологически активные точки за счет согласования с ритмами осмотических процессов и кровотока, а также учета биоритмологических особенностей пациента.

Перечисленные преимущества метода биоуправляемой хронофизиотерапии не делают его, безусловно, панацеей от всех болезней. Однако использование его как части комплексного лечения пациентов открывает большие перспективы в различных областях медицины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биотехнические системы: теория и проектирование / В.М. Ахутин, А.П. Немирко, Н.Н. Першин, А.В. Пожаров, Е.П. Попечителей, С.В. Романов. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 220 с.: ил.
2. Распопова, Н.М. Особенности математической подготовки студентов специальности “Биотехнические и медицинские приборы и системы”. – Вестник новых медицинских технологий. – 1996. – Т. III, № 4. – С. 116-119.
3. <http://www.reacor.ru>
4. Электромиографический аппарат биологической обратной связи “Миотоник – БП”. Паспорт и руководство по эксплуатации.
5. <http://www.biosvyaz.com>
6. Лазеры в клинической медицине. Руководство для врачей / Под ред. С.Д. Плетнева. – М.: Медицина, 1996. – 432 с.; ил.
7. Методические рекомендации по применению магнито-инфракрасного аппарата квантовой терапии Рикта-05 / Под ред. Ю.Б. Хейфеца. – М.: ЗАО “Милта – ПКП ГИТ”, 2001. – 270 с.: ил.
8. Дунаев, А.В. Лазерные терапевтические устройства / А.В. Дунаев, А.Р. Евстигнеев, Е.В. Шалобаев / Под ред. К.В. Подмастерьева: Учебное пособие. – Орел: ОрелГТУ, 2005. – 143 с.
9. Гэлстон, А. Жизнь зеленого растения / А. Гэлстон, П. Дэвис, Р. Сэттер. – М.: Мир, 1983. – 352 с.
10. Техника и методики физиотерапевтических процедур (справочник) / Под ред. В.М. Боголюбова. – Тверь, Губернская медицина, 2002. – 408 с.
11. Загускин, С.Л. Биоритмологическое биоуправление // Хронобиология и хрономедицина / Под ред. Ф.И. Комарова и С.И. Рапопорта. – М.: Триада-Х, 2000. – С. 317-328.
12. Загускин, С.Л. Лазерная и биоуправляемая квантовая терапия / С.Л. Загускин, С.С. Загускина. – М.: Ассоциация «Квантовая медицина», 2005. – 220 с.
13. А/с СССР № 1342512 А61N1/36. Устройство для физиотерапии. С.Л. Загускин, Ю.Ш. Сабиров. Бюл. №11, 20.04.95.

Учебное издание

Бондарева Людмила Александровна
Дунаев Андрей Валерьевич

**БИОТЕХНИЧЕСКИЕ МЕДИЦИНСКИЕ СИСТЕМЫ
ТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Учебное пособие

Редактор М.В. Одолеева
Технический редактор Т.П. Прокудина

Орловский государственный технический университет
Лицензия ИД №00670 от 05.01.2000 г.

Подписано к печати 15.12.2005 г. Формат 60x84 1/16.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 4,2. Усл. печ. л. 4,0. Тираж 100 экз.
Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета
на полиграфической базе ОрелГТУ,
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.