

*Наука начинается с тех пор,
как начинают измерять.
Точная наука немислима без меры.
Д. И. Менделеев*

ПРЕДИСЛОВИЕ

В основу учебного пособия положен опыт чтения кафедрой основ радиотехники Московского энергетического интитута курса «Специальные вопросы биофизики», который входит в учебные планы подготовки бакалавров по направлению 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии» (профиль «Биотехнические и медицинские аппараты и системы»). Первоначально этот курс читался в рамках специализации, затем в соответствии с учебными планами подготовки инженеров, а затем бакалавров и магистров.

Материал пособия базируется на дисциплинах учебного плана направления 12.03.04: «Математика», «Физика», «Основы теории цепей», «Радиотехнические цепи и сигналы», «Электродинамика».

Задача учебного пособия — подготовить будущих инженеров к изучению специальной литературы по биофизике, способствовать успешной работе и творчеству в этой области с использованием знаний и умений, полученных в рамках дисциплин естественнонаучного и технического профиля.

Для выполнения этой задачи в пособии делается акцент на то, что поведение многих объектов, часто встречающихся в механике, теплотехнике, радиоэлектронике, системах автоматического управления и вычислительной технике, во многом подобно поведению живой природы во всем ее многообразии от клеток, органов, организма до биосферы в целом. Это обстоятельство, конечно, при условии хорошей подготовки по естественнонаучным и техническим дисциплинам, позволит, отмежевавшись от подробностей, интересующих медиков и биологов, сосредоточиться на тонкостях и подробностях, которых они не видят в силу специфики их подготовки.

Выпускникам технических университетов следует также всегда помнить о том, что естественнонаучное и техническое образование базируется на *научном методе познания* окружающего мира. Владение этим методом является важной отличительной особенностью такого образования.

С другой стороны, при обследовании больного врач вынужденно концентрирует свое внимание на *явлениях*, которые характеризуют *симптомы* заболевания. Конечно, для глубокого понимания природы

явления и процесса необходимо проникнуть в их *сущность*. И все же практическая медицина — это, прежде всего, ремесло и искусство, а уже затем наука.

Продвижение научных методов познания в повседневную практику является важной миссией специалистов с естественнонаучным и техническим образованием. Поэтому не следует после окончания вуза поспешно уничтожать свои конспекты и приспособляться к конкретной сфере деятельности, переучиваясь зазубриванием новых терминов и правил.

Помните, что научный метод не только позволит быть конкурентноспособными в новой для вас области, но и даст вам шанс внести заметный вклад в наши познания живой природы, неотъемлемой частью которой каждый из нас является.

Материал учебного пособия разбит на три части.

Первая часть касается общих положений биофизики как составной части знаний об окружающем мире. Изложены термодинамические основы существования жизни. Рассмотрены процессы, происходящие в открытых с точки зрения термодинамики системах. Изучаются процессы самоорганизации живого.

Во второй части в рамках классической физики изучаются процессы, который происходят в биообъектах и системах. Рассматриваются ионная проводимость биологических растворов, электрофорез, диффузия заряженных частиц, которая приводит к возникновению клеточного мембранного потенциала, пассивный и активный транспорт, модели распространения потенциала действия. Приведены модели электродинамических параметров биотканей.

В третьей части рассмотрены свойства биополимеров на уровне атомов и молекул с привлечением основных положений квантовой теории. Рассмотрено взаимодействие электромагнитного поля с веществом в электродипольном и магнитодипольном приближениях. Рассмотрены такие важные с практической точки зрения явления, как оптическая активность, электронный парамагнитный и ядерный магнитный резонансы.

Части имеют самостоятельное значение. Материал изложен так, что каждая часть может изучаться практически независимо от других.

В конце пособия приведен список литературы. Основная его часть относится непосредственно к биофизике как самостоятельной дисциплине. В дополнительную часть включены литературные источники, относящиеся к конкретным аспектам содержания учебного пособия. В эту часть включены, в частности, учебники и учебные пособия по курсам теории электрических цепей, радиотехнических цепей

и сигналов, электродинамики и общей физики. Это сделано в соответствии с поставленной автором задачей (см. выше). Но прежде все для того, чтобы показать и убедить читателя в ценности фундаментальных знаний.

Читателю, решившему посвятить себя работе в области биомедицинских аппаратов и систем или области биологии и биофизики, желаю успехов в освоении материала. Надеюсь, что учебное пособие при желании или необходимости поможет перейти к более глубокому освоению биофизики.

В. В. Штыков
Июнь 2018

**ЧАСТЬ ПЕРВАЯ
БИОФИЗИКА
В ПОЗНАНИИ ПРИРОДЫ**

Биофизика в познании природы жизненных процессов занимает важное место среди таких дисциплин, как цитология, генетика, биохимия, физиология и пр. Эта наука изучает физические механизмы и физико-химические процессы, которые лежат в основе жизнедеятельности биологических объектов. Это физика живых систем на различных уровнях их организации — молекулярном, мембранном, клеточном, органов, популяций и биосферы.

Дату рождения биофизики, как и любой науки, даже приблизительно установить невозможно. Пожалуй, за начало биофизических исследований можно принять работу Л. Гальвани¹ о влиянии электричества на мышцу. Важную роль в формировании биофизики как науки в XIX в. сыграли работы Т. Юнга², в которых впервые была высказана идея о гидродинамической природе сердечной деятельности и природе цветного зрения. Большой вклад в обоснование закона сохранения энергии в живых системах внесли работы Р. Майера³ и Г. Гельмгольца⁴. Крупнейший естествоиспытатель XIX в. Г. Гельмголец внес также значительный вклад в разработку биофизики зрения и слуха. Он впервые измерил с достаточной степенью точности скорость распространения нервного импульса. Огромное значение для развития биофизических подходов к жизненным процессам сыграло создание в конце XIX в. С. Аррениусом⁵ теории электролитической диссоциации солей в водных растворах, которая вскоре была использо-

¹ **Луиджи Гальвани** (итал. *Luigi Galvani*; 1737–1798) — итальянский врач, анатом, физиолог и физик, один из основателей электрофизиологии, основоположник экспериментальной электрофизиологии. Первым исследовал электрические явления при мышечном сокращении. Обнаружил возникновение разности потенциалов при контакте разных видов металла и электролита.

² **Томас Юнг** (англ. *Thomas Young*; 1773–1829) — английский физик, механик, врач, астроном и востоковед. Наиболее важные направления его работ — оптика, механика, физиология зрения, филология.

³ **Юлиус Роберт фон Майер** (нем. *Julius Robert von Mayer*; 1814–1878) — немецкий врач и естествоиспытатель. Он четко сформулировал закон сохранения энергии и теоретически рассчитал численное значение механического эквивалента теплоты.

⁴ **Герман Людвиг Фердинанд фон Гельмгольц** (нем. *Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz*; 1821–1894) — немецкий физик, врач, физиолог и психолог. Он формулирует закон сохранения энергии строже и детальнее, чем Роберт Майер. Способствовал признанию теории цветного зрения Т. Юнга.

⁵ **Сванте Август Аррениус** (швед. *Svante August Arrhenius*; 1859–1927) — выдающийся шведский физико-химик, автор теории электролитической диссоциации, лауреат Нобелевской премии по химии (1903).

вана В. Нернстом¹ для создания ионной теории биоэлектрических явлений.

Большой вклад в развитие биофизики внесли отечественные ученые. И. М. Сеченов², изучая процесс дыхания у животных, вывел закон растворимости газов в крови. В. Ю. Чаговец³ в 1906 г., исходя из теории электролитической диссоциации, создал конденсаторную теорию возбуждения нервных тканей. Созданная им ионная теория происхождения биоэлектрических явлений имела большое значение для дальнейших исследований механизма возникновения биопотенциалов. В. Ю. Чаговец экспериментально показал, что живые ткани поляризуются под влиянием электрического поля, определил величины удельной электрической емкости для некоторых тканей. Представления об ионной природе процесса возбуждения затем интенсивно развивались П. П. Лазаревым⁴, по инициативе которого в 1919 г. в Москве был создан *первый в мире* Институт биологической физики (Государственный биофизический институт).

В дальнейшем развитие биофизики в СССР связано с именами Г. М. Франка⁵, Н. В. Тимофеева-Ресовского⁶, Б. П. Белоусова⁷,

¹ **Вальтер Герман Нернст** (нем. *Walther Hermann Nernst*; 1864–1941) — немецкий химик, лауреат Нобелевской премии по химии в 1920 г. «в признание его работ по термодинамике».

² **Иван Михайлович Сеченов** (1829–1905) — выдающийся русский физиолог, ученый-энциклопедист. Превратил физиологию в точную науку и клиническую дисциплину, используемую для постановки диагноза, выбора терапии, прогноза, разработки любых новых методов диагностики, лечения и реабилитации.

³ **Василий Юрьевич Чаговец** (1873–1941), советский физиолог, академик АН УССР (1939). Исследовал физико-химическую природу электрических потенциалов в живых тканях и механизм электрического раздражения последних, впервые применив для объяснения этих процессов теорию электролитической диссоциации.

⁴ **Петр Петрович Лазарев** (1878–1942) — российский и советский физик, биофизик и геофизик, академик АН СССР (1917). В 1918 г. организовал издание журнала «Успехи физических наук» и стал его первым главным редактором. Труды его относятся к области физиологии, молекулярной физики, фотохимии.

⁵ **Глеб Михайлович Франк** (1904–1976) — советский биофизик, академик АН СССР (1960), член-корреспондент АМН СССР (1945). Основные труды по биологическому действию УФ-излучения, биофизике мышечного сокращения.

⁶ **Николай Владимирович Тимофеев-Ресовский** (1900–1981) — биолог, генетик. Основные направления исследований: радиационная генетика, популяционная генетика.

⁷ **Борис Павлович Белоусов** (1893–1970) — советский химик и биофизик. Им была открыта колебательная реакция, которая является одной из первых работ в области нелинейной химической динамики. В 1980 г. ему была присуждена Ленинская премия: за обнаружение нового класса автоволновых процессов.

А. М. Кузина¹, М. В. Волькенштейна² и многих других исследователей.

Однако лишь только во 2-й половине XX в. биофизика перешла от изучения физических свойств организмов и физических воздействий на них к фундаментальным проблемам — исследованию наследственности и изменчивости, метаболизма и биоэнергетики, а также онтогенеза и филогенеза.

Биофизика как самостоятельная наука утвердилась в 50-е гг. XX в. Этому способствовало интенсивное взаимопроникновение в биофизические исследования творческих подходов физики и математики.

В 1952 г. был организован Институт биологической физики АН СССР на базе лаборатории биофизики, изотопов и излучений А. М. Кузина. В 1963 г. институт был переведен в город Пущино Московской области, где на его базе формировался Пущинский научный центр биологических исследований. Некоторые отделы и лаборатории института позднее выросли в самостоятельные академические институты.

Биологические формы движения материи являются сложными, но они включают более простые физические и химические формы, которые проявляются в новых качественных и количественных сочетаниях. Исходя из этих материалистических позиций, физика с ее методами является очень важным ключом для решения многих проблем современной биологии. Вместе с тем правильное использование законов физики возможно только при наличии определенных границ системы, для которой можно проводить исследования и расчеты.

В 1961 г. был организован Международный союз чистой и прикладной биофизики. С этого времени с определенной периодичностью начали проводиться Международные биофизические конгрессы: в Стокгольме (1961), Вене (1966), Мюнхене (1969), Москве (1972), Копенгагене (1975), Киото (1978), Мехико (1981), Бристоле (1984).

В 1982 г. в Москве состоялся I-й Всесоюзный биофизический съезд, где были представлены теоретические и экспериментальные материалы по всем разделам современной биофизики. В 1999 г. прошел II-й съезд биофизиков России, который явился крупнейшим

¹ **Александр Михайлович Кузин** (1906–1999) — советский биофизик и радиобиолог. Член-корреспондент АН СССР (1960). Основные труды по биохимии и молекулярным основам действия ионизирующих излучений на живые организмы.

² **Михаил Владимирович Волькенштейн** (1912–1992) — советский физико-химик и биофизик, Член-корреспондент АН СССР (1966). Профессор кафедры физики живых систем МФТИ. Специалист в области молекулярной спектроскопии, физики макромолекул, молекулярной биофизики.

смотром научных достижений на рубеже веков. В работе съезда приняла участие более 1000 специалистов-биофизиков и ученых из смежных областей науки.

В октябре 2015 г. прошел V-й съезд биофизиков России. В программу работы съезда были включены следующие вопросы:

- структура и динамика белков и их комплексов;
- структура и динамика нуклеиновых кислот и их комплексов;
- биофизика клетки, мембранные процессы;
- биологическая подвижность, молекулярные моторы;
- механизмы трансформации энергии: митохондрии, фотосинтез;
- биофизика сложных систем;
- медицинская биофизика;
- фотобиология и биофотоника;
- действие физико-химических факторов на биологические системы;
- экологическая биофизика;
- нейродинамика и нейробиология;
- биоинформатика и системная биология;
- новые методы в биофизических исследованиях;
- биофизика одиночных молекул, нанобиотехнологии;
- биофизическое образование.

Перечень дает представление о задачах, которые решает современная биофизика.

Развитие биофизики, как, впрочем, и любой другой науки, невозможно без широкой сети биофизического образования. Поэтому не удивительно, что в программу работы V-го съезда биофизиков России был включен и вопрос об образовании по направлению «Биофизика».

Первый курс по биофизике был прочитан П. П. Лазаревым в 1922 г. при клинике Московского университета. В 1927 г. он прочитал курс для студентов физико-математического факультета Ленинградского политехнического института. К концу 1930-х гг. стали читать отдельные главы биофизики и в других учебных заведениях.

В 1953 г. была организована первая специализированная кафедра биофизики на биолого-почвенном факультете в МГУ (Б. Н. Тарусов¹). В 1959 г. была создана кафедра на физическом факультете

¹ **Борис Николаевич Тарусов** (1900–1977) — известный советский биофизик, ученый и педагог, сыграл выдающуюся роль в становлении и развитии биофизической школы в нашей стране. Создатель первой в Советском Союзе кафедры биофизики на биологическом факультете Московского государственного университета.

МГУ (Л. А. Блюменфельд¹). Затем были созданы специализированные кафедры биофизики в Московском физико-техническом институте, в ряде медицинских вузов и университетов по всей стране. К 1982 г. в стране уже существовало свыше 20 кафедр биофизики. Общее количество подготовленных ими на тот момент специалистов превысило 2000 человек. Эта цифра к началу XXI века, по-видимому, приблизилась к 10 тысячам.

Современная биофизика использует новейшие методы исследования и строгие количественные доказательства каждого положения. В ней широко применяются такие точные и чувствительные биофизические методы исследования, как электрофорез, калориметрия, рентгеноструктурный анализ, спектрофотометрия, спектроскопия комбинационного рассеяния, спектрополяриметрия, электронный парамагнитный и ядерный резонансы, электронная микроскопия и др. Эти методы сочетаются с математическим моделированием исследуемых систем с помощью ЭВМ. Все это делает биофизику теоретической основой современной биологии и медицины.

Все эти методы, во-первых, требуют создания и эксплуатации специальной электронной аппаратуры практически во всем частотном спектре электромагнитных колебаний. А во-вторых, результаты измерений, несущие информацию об исследуемых процессах и объектах, должны быть выделены на фоне помех, преобразованы, оптимально обработаны и сохранены, так же как это делается в традиционных системах связи. Как видите в сфере биофизики, биологии и медицины для радиоинженеров (и вообще для специалистов по радиоэлектронике и информатике) открывается широкое поле профессиональной деятельности.

Успех вашей работы будет во многом (если не полностью) зависеть от уровня подготовки по базовым дисциплинам учебного плана — физике, математике, электротехнике, основам теории цепей, радиотехническим цепям и сигналам, электродинамике, основам теории обработки дискретных сигналов, цифровой и микропроцессорной технике и др.

¹ **Лев Александрович Блюменфельд** (1921–2002) — российский советский физик, основатель крупнейшей биофизической школы, заслуженный деятель науки РФ (1999), глава Совета по радиоспектроскопии при АН СССР.

1. БИОФИЗИКА — СОСТАВНАЯ ЧАСТЬ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Если исходить из определения физики как науки, изучающей строение и свойства конкретных видов материи (вещество и поле) и формы существования материи (пространство и время), то *разграничения живой и неживой природы не существует*. Это определение не означает сведения всего естествознания к физике, но из него следует, что теоретические основы любой области естествознания имеют *физический характер*. Эти основы уже раскрыты, например, в химии, которая, по сути, изучает структуру и изменения электронных оболочек атомов и молекул при их взаимодействии. Следовательно, теоретическая химия сегодня полностью основана на квантовой и статистической механике, на термодинамике и физической кинетике.

Биология — это наука о живой природе, объекты которой значительно сложнее неживых. Поэтому ей предстоит пройти еще долгий путь, прежде чем удастся раскрыть сколько-нибудь полно глубинные физические основы биологических явлений.

Таким образом, можно определить биофизику как физику явлений жизни, изучаемых на всех уровнях, начиная с молекул и клеток и кончая биосферой в целом. Такое определение биофизики противостоит ее пониманию как вспомогательной области биологии или физиологии. Содержание биофизики не связано только с применением физических приборов в биологическом эксперименте. Медицинский термометр, электрокардиограф, микроскоп — физические приборы, но врач или биолог, пользующийся этими приборами, вовсе не занимается биофизикой. *Биофизическое исследование начинается с физической постановки задачи, относящейся к живой природе*. Это означает, что задача формулируется, исходя из *общих законов физики и атомно-молекулярного строения вещества*. Конечная цель биофизики состоит в обосновании теоретической биологии.

Живая природа настолько сложна, что биологические знания недостаточны для реализации физических подходов. Однако биология продолжает стремительно развиваться, с ее современным развитием неразрывно связано развитие биофизики.

Будучи частью физики, биофизика, тем не менее, неотделима от биологии. Для успешной работы в области биофизики *желательно (но не обязательно!)* иметь общее понимание живой природы.

Преодолевая трудности, современная биофизика достигла значимых успехов в объяснении ряда биологических явлений. Теперь многое известно о строении и свойствах биологических молекул, о свойствах и механизмах действия клеточных мембран и структур, биоэнергетических и механохимических систем. Успешно разрабатываются физико-математические модели биологических процессов, вплоть до онтогенеза и филогенеза. Разработаны теоретические подходы к явлениям жизни, основанные на термодинамике, теории информации, теории автоматического регулирования. Эти вопросы будут рассмотрены в этом учебном пособии. При этом мы будем исходить из физических закономерностей, а не из физиологической классификации.

1.1. Физика и биология

Возникает вполне естественный вопрос — достаточна ли современная физика для решения биологических проблем, для обоснования теоретической биологии? Не потребуются ли биофизике новая, еще не существующая физика? В истории науки неоднократно разработанные ранее теории достигали границ своей применимости, что проявлялось в возникновении противоречий в системе знаний. В результате разрешения этих противоречий возникала принципиально новая система представлений (*новая парадигма*). Именно так возникли и теория относительности, и квантовая механика. Не исключено, что биофизика должна быть построена на основе некой новой физики. Однако это не означает, что не следует пытаться познавать биологические процессы, оставаясь в рамках современной физики.

Вопрос о достаточности физики для решения проблем биологии тесно связан с существованием концепции *витализма*, согласно которой биологические явления принципиально непостижимы на основе физики и химии, так как существует некая «жизненная сила», или *энтелехия*, или *биологическое поле*, не подлежащие физическому истолкованию. Однако по своей сути *витализм не научен*, он отрицает единство природы и, в конечном счете, приходит к теологии.

В современной науке неконструктивные виталистические представления уже не фигурируют. Однако следует иметь в виду, что стихийный витализм все еще существует в бытовом сознании. В нашей стране на то есть особые исторические причины.

Дело в том, что на рубеже XVIII–XIX вв. материализм и научная методология французских энциклопедистов и естествоиспытателей на-

шли благодатную почву в России. Одним из наиболее последовательных проводников их в медицинскую среду был профессор физики Санкт-Петербургской медико-хирургической академии В. В. Петров¹, больше известный своим открытием электрической дуги. Он преподавал студентам академии физику и настойчиво прививал им научную методологию. Он утверждал, что *врач, не владеющий научным методом, неполноценен*.

Однако после победы над Наполеоном в России начались гонения и борьба с французскими идеями. Наступила эпоха реакции, которая искореняла в российском обществе ростки свободомыслия. В медицине материалистическую доктрину старались заменить натурфилософией, отвергавшей эксперимент как метод познания. Во врачебной среде научная методология быстро теряла своих приверженцев. Поднял голову мистицизм, прежде всего, в форме широко пропагандируемого месмеризма («животного магнетизма»).

Западная Европа довольно быстро стала преодолевать последствия решений Венского конгресса 1815 г.², а в России этот процесс затянулся.

В прошлом веке успехи генетики и других областей биологии и медицины стали убедительным свидетельством плодотворности научной методологии в решении медико-биологических проблем. Государство нашей страны выделяло немалые средства на науку, на воспитание научных кадров. В медицинских вузах с конца 60-х гг. XX в. стали преподавать биофизику, прежде всего, ради воспитания врачей в духе научной методологии.

Однако в конце XX в. — начале XXI в. отечественная медицина переживает очередной кризис. Целительницы и целители заполонили экраны телевизоров и страницы газет. Бесовщина и прочие чудеса сейчас очень популярны в нашем больном обществе. Логическим следствием очередного пренебрежения научной методологией в медицине явилось, начиная с 2001–2002 учебного года, резкое сокращение в медицинских вузах числа учебных часов на фундаментальные медико-биологические дисциплины и почти полное прекращение преподавания биофизики. Однако именно она наиболее эффективно

¹ **Василий Владимирович Петров** (1761–1834) — русский физик-экспериментатор, электротехник-самоучка, с 1809 г. академик Петербургской академии наук.

² Венский конгресс 1814–1815 гг. — общеевропейская конференция, в ходе которой была выработана система договоров, направленных на восстановление феодально-абсолютистских монархий, разрушенных Французской революцией.

внедряла в сознание студентов научный метод изучения природы. Остается надеяться, что за нынешним спадом последует очередной подъем.

Биология в процессе своего развития ставила вопросы перед физикой и таким образом влияла на нее. Так, закон сохранения энергии (первое начало термодинамики) был открыт Р. Майером, Д. Джоулем¹ и Г. Гельмгольцем. Р. Майер исходил из наблюдений над живыми организмам. Г. Гельмгольц в своих исследованиях основывался на биологических явлениях, руководствуясь четкой антивиталистической концепцией. Так что не только биофизика, но и физика в целом развивались на пути преодоления витализма.

К проблемам биологии и жизни вообще обращались многие знаменитые физики XX в.

В 1927 г. Н. Бор² сформулировал принцип дополнительности — одно из фундаментальных положений квантовой теории. Частным случаем этого принципа является известное вам соотношение неопределенностей Гейзенберга, состоящее в том, что в акте измерения пространственные координаты и импульс квантовой системы или ее энергия и время не могут быть одновременно измерены с произвольной степенью точности. Н. Бор постулировал, что либо энергия и импульс квантовой системы, либо ее пространственные координаты и время не могут проявляться вместе, одновременно, а могут лишь дополнять одна другую. Позднее этот принцип приобрел общенаучное и философское значение.

Н. Бор считал дополнительными исследования живых организмов на атомно-молекулярном уровне и как целостных систем. Эти два вида исследований несовместимы. В то же время «ни один результат биологического исследования не может быть однозначно описан иначе, как на основе понятий физики и химии». Жизнь следует рассматри-

¹ **Джеймс Прескотт Джоуль** (англ. *James Prescott Joule*; 1818–1889) — английский физик, внесший значительный вклад в становление термодинамики. Обосновал на опытах закон сохранения энергии. Установил закон, определяющий тепловое действие электрического тока. Вычислил скорость движения молекул газа и установил ее зависимость от температуры.

² **Нильс Хенрик Дэвид Бор** (дат. *Niels Henrik David Bohr*; 1885–1962) — датский физик-теоретик и общественный деятель, один из создателей современной физики. Лауреат Нобелевской премии по физике (1922). Член Датского королевского общества (1917) и его президент с 1939 г. Был членом более чем 20 академий наук мира, в том числе иностранным почетным членом АН СССР (1929). Бор известен как создатель первой квантовой теории атома и активный участник разработки основ квантовой механики.

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru