

ПРИНЦИПЫ ФИЗИОЛОГИИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ

Ричард Э. Клабунде,

PhD, профессор физиологии,
Биомедицинские науки
Колледж остеопатической медицины
Университета Мэриан,
г. Индианаполис, штат Индиана, США

Третье издание

перевод с английского
«Cardiovascular Physiology Concepts»

под редакцией

Сухова Валентина Константиновича



Санкт-Петербург

2021

Cardiovascular Physiology Concepts

THIRD EDITION

Richard E. Klabunde, PhD

Professor of Physiology

Biomedical Sciences

Marian University College of Osteopathic Medicine

Indianapolis, Indiana



Wolters Kluwer

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Для человека, полвека профессионально занимавшегося клинической физиологией в качестве специалиста по эдоваскулярной диагностике и лечению, книга Ричарда Э. Клубунде предмет восхищения. Ее представление принесет несомненную пользу и врачам, и студентам. Ясность и лаконичность изложения основных принципов физиологии сердечно-сосудистой системы сочетается в ней с широтой охвата и глубиной освещения всех ее составляющих. До недавнего времени сердечно-сосудистая система рассматривалась с позиций гидравлики, в которой насос, русло и жидкость были представлены как единое целое для перемещения объема в замкнутой системе циркуляции. Накопленные за годы новые знания позволили в данной книге более детально изложить современное представление о сложном механизме регуляции кровотока, направленного на поддержание уровня и качества гомеостаза в условиях нормы и патологии. На первое место в этом процессе выдвигается функция крови в качестве основного посредника между клеткой и внешней средой, транспортера, подающего все элементы, необходимые для клеточного метаболизма. Поэтому гуморальные механизмы управления и регуляции становятся более понятными с точки зрения их значимости формирования физических составляющих перемещения крови. Именно эта часть физиологии подчеркнута в учебнике, написанном Р. Э. Клубунде.

Подача материала, формат и стиль построены таким образом, чтобы читателю было легче усвоить сложный многообразный материал. Каждой главе предшествует перечень основных явлений физиологии, которые будут рассмотрены, и той информации, на которую необходимо обратить внимание и запомнить в первую очередь.

Каждая глава заканчивается перечнем вопросов, позволяющих читателю проверить правильность восприятия почерпнутой информации. Надо сказать, что столь насыщенный смыслом текст не всегда удается связать в единое целое, но автор сделал все от него зависящее, чтобы у читателя было меньше поводов для сомнений. В предисловии он объяснил почему сегодня становится важным рассматривать физиологию кровообращения как результат взаимодействия молекулярных и ионных элементов на всех уровнях регуляции кровотока от сердца до капилляров, от головного мозга до синапсов нервных окончаний. На самом деле оптимальная медикаментозная терапия и оптимизация любых лечебных интервенций немислимы без детального понимания, в первую очередь, физиологии кровообращения.

Надо отдать должное почтению и выразить благодарность компании «Технопроект», выступившей инициатором и организатором в оптимизации образовательного процесса, построенного на издании современной медицинской литературы, в лице ее директора Ерофеева Н.И., а также Кирюхиной А.В.



**Сухов Валентин Константинович,
научный редактор русского перевода**

доктор медицинских наук, заслуженный врач РФ,
профессор кафедры сердечно-сосудистой хирургии
ФГБОУ ВО СЗГМУ им И. И. Мечникова Минздрава России,
главный внештатный специалист по рентгенэндovasкулярной
диагностике и лечению по Санкт-Петербургу

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебники по физиологии сердечно-сосудистой системы традиционно подчеркивают биофизические принципы, такие как поведение текущей крови, механика сокращения мышц и системы управления с обратной связью. За последние три десятилетия мы получили значительные знания о функции эндотелия, мембранных рецепторах, ионных каналах и механизмах передачи сигналов, которые регулируют сердечную и сосудистую функцию. Это новое понимание клеточных механизмов произвело революцию не только в нашем понимании сердечно-сосудистой функции, но и в том, как врачи диагностируют и лечат пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями. Принципы сердечно-сосудистой физиологии были написаны для того, чтобы предоставить студентам-медикам, аспирантам и смежным медицинским специалистам прочную основу в традиционных биофизических принципах и новых принципах клеточной физиологии.

Этот учебник включает в себя несколько функций, помогающих читателю в обучении: (1) каждая глава начинается со списка целей обучения, чтобы направить читателя к ключевым концепциям, (2) текст дополнен проблемами и клиническими случаями, используемыми для укрепления фундаментальных физиологических концепций, (3) важные концепции обобщены в конце каждой главы, (4) в главах перечислены соответствующие ресурсы для чтения, и (5) в качестве инструмента самооценки читателю предоставляются обзорные вопросы с пояснениями.

Многие темы, представленные в этом учебнике, помещены в медицинский контекст, описывая, как основные физиологические концепции связаны с болезненными состояниями, такими как аритмия, аномальное кровяное давление и сердечная недостаточность, а также с клинической диагностикой и терапевтическим вмешательством. Несколько глав содержат клинические случаи, иллюстрирующие клиническое применение важных физиологических концепций.

В первых восьми главах обсуждается физиология сердечно-сосудистой системы в соответствии с традиционной организацией тем. Последняя глава объединяет материал предыдущих глав, описывая, как сердечно-сосудистая система реагирует и адаптируется к повышенным требованиям организма (например, физические нагрузки и беременность) или к патофизиологическим состояниям (например, гипотензия, гипертония, сердечная недостаточность и заболевания сердечных клапанов).

Хотя основной формат третьего издания аналогичен второму изданию, многие разделы глав были переписаны для большей ясности и обновления наших знаний по конкретным темам. Более 40% цифр были пересмотрены или являются новыми в третьем издании. Новое содержание включает дополнительные материалы по электрофизиологии сердца во время ишемии, кровообращению плода и гемодинамическим изменениям, связанным с заболеваниями коронарных и периферических артерий.

Физиология сердечно-сосудистой системы, как и все области биомедицинской науки, может быть ошеломляющей по объему знаний, представленных читателю. По этой причине я постарался представить фундаментальные концепции на уровне, подходящем для студентов-медиков в доклинические годы обучения. Этих концепций будет более чем достаточно, чтобы обеспечить необходимую основу для понимания сердечно-сосудистой фармакологии и терапии, а также сердечно-сосудистой патофизиологии. Я надеюсь, что читатель не только узнает, как функционирует сердечно-сосудистая система, но и проникнется благоговением перед великолепием человеческого тела.

*Ричард Э. Клабунде, доктор философии
Индианаполис, штат Индиана*

БЛАГОДАРНОСТЬ

Я хочу выразить признательность за вдохновение, которое я получил от своего выпускника-консультанта Пола К. Джонсона, который своим примером научил меня стремиться к совершенству как в преподавании, так и в исследованиях. Я также благодарен другому факультету физиологии Аризонского университета в начале 1970-х годов за их заразительную любовь и энтузиазм к физиологии. Отзывы студентов-медиков, которых я преподавал более 40 лет, оказали неоценимую помощь в стимулировании меня к изучению новых способов более эффективного преподавания физиологии сердечно-сосудистой системы. Я ценю полезные предложения тех, кто критически рассмотрел первое и второе издания. Эти люди предложили много ценных комментариев, которые помогли обогатить содержание и формат этого третьего издания. Я также хочу поблагодарить всех талантливых сотрудников Wolters Kluwer, которые работали со мной над этим учебником. Особую благодарность заслуживают моя любящая и терпеливая жена Карен, наши четверо сыновей, а также мои родители, которые всегда поощряли меня следовать своим мечтам. Наконец, я хочу поблагодарить Бога за то, что он позволил мне осуществить мои мечты.

*Ричард Э. Клубунде, PhD
г. Индианаполис, штат Индиана
США*

СОДЕРЖАНИЕ

Глава 1

ВВЕДЕНИЕ В ФИЗИОЛОГИЮ

СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ 1

НЕОБХОДИМОСТЬ В КРОВЕНОСНОЙ СИСТЕМЕ 1

ОРГАНИЗАЦИЯ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ 2

ФУНКЦИИ СЕРДЦА И КРОВЕНОСНЫХ СОСУДОВ 4

Сердце 4

Сосудистая система 7

Взаимосвязь между сердечно-сосудистой системой
и функциями органов 7

РЕГУЛЯЦИЯ ФУНКЦИЙ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ 8

Содержание материала следующих глав 10

Основные тезисы данной главы 11

Вопросы для повторения 12

Ответы на вопросы 13

Глава 2

СТРУКТУРА И ФУНКЦИИ КЛЕТОК 14

Введение 14

СТРУКТУРА И ФУНКЦИИ КЛЕТОК СЕРДЦА 15

Миоциты и саркомеры 15

Сопряжение возбуждения и сокращения 18

Регуляция сокращения (инотропия) 20

Регуляция расслабления миокарда (лузитропный эффект) 25

Метаболизм кардиомиоцитов 26

СТРУКТУРА И ФУНКЦИИ КЛЕТОК СЕРДЦА 27

Клетки гладких мышц сосудистой стенки 28

Эндотелиоциты сосудистой стенки 34

Основные тезисы данной главы 36

Вопросы для повторения 37

Ответы на вопросы 38

Ответы на задачи 39

Литература

Глава 3

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ СЕРДЦА 41

Введение	42
МЕМБРАННЫЕ ПОТЕНЦИАЛЫ КЛЕТКИ	42
Мембранный потенциал покоя.....	42
Поддержание ионных градиентов концентрации.....	47
Ионные каналы	49
Потенциалы действия	52
Аритмии, вызванные нарушениями генерации потенциалов действия	60
РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛОВ ДЕЙСТВИЯ В СЕРДЦЕ.....	62
Электрическая проводимость сердца.....	62
Регуляция скорости проведения импульсов	64
Нарушения проводимости.....	66
Тахикардия, вызванная повторным входом импульса	66
ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММА.....	69
Регистрация ЭКГ	69
Интерпретация ЭКГ для определения нормы и нарушений ритма сердца.....	71
Принципы проведения совокупности электрических импульсов и правила интерпретации ЭКГ	75
Отведения ЭКГ: расположение электродов	79
ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИ ИШЕМИИ СЕРДЦА	86
Основные тезисы данной главы	89
Вопросы для повторения.....	91
Ответы на вопросы.....	93
Ответы на задачи	95
Литература	96

Глава 4

СЕРДЕЧНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ 97

Введение.....	98
АНАТОМИЯ СЕРДЦА.....	98
Функциональная анатомия сердца	98
Вегетативная иннервация.....	99
СЕРДЕЧНЫЙ ЦИКЛ	100
Диаграмма сердечного цикла	100
Фаза 1. Систола предсердий.....	102
Фаза 2. Изоволюметрическое сокращение	103
Фаза 3. Быстрое изгнание	104
Фаза 4. Медленное изгнание.....	104
Фаза 5. Изоволюметрическое расслабление	104

Фаза 6. Быстрое наполнение.....	105
Фаза 7. Медленное наполнение	106
Краткое описание показателей внутрисердечного давления.....	106
Взаимосвязь давления и объема желудочка.....	107
СЕРДЕЧНЫЙ ВЫБРОС.....	109
Измерение сердечного выброса.....	110
Зависимость сердечного выброса от частоты сердечных сокращений и ударного объема	111
ВЛИЯНИЕ ПРЕДНАГРУЗКИ НА УДАРНЫЙ ОБЪЕМ.....	112
Влияние податливости желудочков на преднагрузку.....	112
Влияние преднагрузки на развитие напряжения (отношение между длиной и напряжением мышечного волокна)	114
Влияние венозного возврата на ударный объем (механизм Франка – Старлинга)	118
Краткий обзор эффектов влияния увеличения преднагрузки на механику сердечной мышцы и работу желудочков	122
Факторы, определяющие преднагрузку желудочков	122
ЗАВИСИМОСТЬ УДАРНОГО ОБЪЕМА ОТ ПОСТНАГРУЗКИ	124
Влияние постнагрузки на скорость укорочения волокон (отношение сил–скорость).....	124
Влияние постнагрузки на кривые Франка – Старлинга	128
Влияние постнагрузки на диаграмму «объем–давление».....	128
Краткое описание влияния увеличения постнагрузки на механику сердечной мышцы и работу желудочков	130
ЗАВИСИМОСТЬ УДАРНОГО ОБЪЕМА ОТ ИНОТРОПИИ	130
Влияние инотропии на отношение «длина–напряжение» в мышечных волокнах.....	130
Влияние инотропии на отношение сила–скорость.....	131
Влияние инотропии на кривые Франка – Старлинга	132
Влияние инотропии на диаграмму «объем–давление»	132
Краткое описание влияния увеличения инотропии на механику сердечной мышцы и работу желудочков	134
Факторы, влияющие на инотропное состояние.....	134
Клеточные механизмы инотропии	135
ВЗАИМОЗАВИСИМОСТЬ ПРЕДНАГРУЗКИ, ПОСТНАГРУЗКИ И ИНОТРОПИИ.....	136
ПОТРЕБЛЕНИЕ КИСЛОРОДА СЕРДЕЧНОЙ МЫШЦЕЙ.....	139
Как определить потребление кислорода сердечной мышцей	139
Факторы, определяющие потребление кислорода сердечной мышцей.....	141
Основные тезисы данной главы	144
Вопросы для повторения	145
Ответы на вопросы.....	146
Ответы на задачи	148
Литература	150

Глава 5
ФУНКЦИИ СОСУДОВ..... 151

Введение.....	152
АНАТОМИЯ И ФУНКЦИИ	152
Сосудистая сеть	152
Распределение давления и объема	155
АРТЕРИАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ	157
Среднее артериальное давление.....	158
Пульсовое давление в аорте.....	160
ГЕМОДИНАМИКА (ДАВЛЕНИЕ, КРОВОТОК И СОПРОТИВЛЕНИЕ)	163
Зависимость сопротивления току крови от длины и радиуса сосудов и вязкости крови.....	163
Ламинарное и турбулентное течение крови	168
Последовательное и параллельное соединение сосудов	170
РЕГУЛЯЦИЯ СИСТЕМНОГО СОСУДИСТОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ.....	174
Вычисление системного сосудистого сопротивления.....	174
Тонус сосудов	175
ВЕНОЗНОЕ ДАВЛЕНИЕ.....	176
Объем венозной крови и податливость вен	176
Механические факторы, влияющие на центральное венозное давление и венозный возврат	178
Краткое изложение факторов, влияющих на центральное венозное давление	183
ВЕНОЗНЫЙ ВОЗВРАТ И СЕРДЕЧНЫЙ ВЫБРОС.....	185
Баланс между венозным возвратом и сердечным выбросом	185
Функциональные кривые сосудов системного круга кровообращения	185
Функциональные кривые сердца	190
Взаимодействие функциональных кривых сердца и сосудов системного круга кровообращения.....	191
Основные тезисы данной главы	193
Вопросы для повторения	194
Ответы на вопросы.....	195
Ответы на задачи	197
Литература	199

Глава 6
НЕЙРОГУМОРАЛЬНАЯ РЕГУЛЯЦИЯ ФУНКЦИЙ
СЕРДЦА И СОСУДОВ 200

Введение.....	200
ДЕЙСТВИЕ ВЕГЕТАТИВНОЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ	201
Вегетативная иннервация сердца и сосудов.....	201
Регуляция по типу обратной связи артериального давления через барорецепторы	210

Хеморецепторы	219
Другие вегетативные рефлексы, регулирующие функции сердца и сосудов.....	220
ГУМОРАЛЬНАЯ РЕГУЛЯЦИЯ.....	222
Циркулирующие в крови катехоламины	222
Ренин-ангиотензин-альдостероновая система	225
Натрийуретические пептиды	228
Вазопрессин (антидиуретический гормон)	230
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕЙРОГУМОРАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ	232
Основные тезисы данной главы.....	234
Вопросы для повторения	236
Ответы на вопросы.....	238
Ответы на задачи.....	240
Литература	241

Глава 7

КРОВТОК В ОРГАНАХ.....242

Введение.....	242
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СЕРДЕЧНОГО ВЫБРОСА	242
ЛОКАЛЬНАЯ РЕГУЛЯЦИЯ КРОВотоКА	244
Тканевые факторы	245
Эндотелиальные факторы.....	248
Гладкомышечные (миогенные) механизмы регуляции	250
Внесосудистая компрессия.....	251
Ауторегуляция кровотока.....	252
Реактивная и активная гиперемия.....	255
ЦЕНТРАЛЬНОЕ И ПЕРИФЕРИЧЕСКОЕ КРОВООБРАЩЕНИЕ.....	257
Сердце.....	257
Мозговое кровообращение	267
Кровообращение в скелетных мышцах.....	272
Кровообращение в коже	276
Висцеральное кровообращение	280
Кровообращение в почках	282
Легочное кровообращение.....	287
Краткий обзор систем регионарного кровообращения	289
Основные тезисы данной главы.....	291
Вопросы для повторения	292
Ответы на вопросы.....	293
Ответы на задачи.....	295
Литература	296

Глава 8

ОБМЕННАЯ ФУНКЦИЯ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ297

Введение.....	297
МЕХАНИЗМЫ ОБМЕНА.....	298
Диффузия.....	298
Объемный поток.....	299
Везикулярный и активный транспорт.....	300
ОБМЕН КИСЛОРОДА И УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА.....	301
Диффузия кислорода.....	301
Доставка и поглощение кислорода.....	303
Диффузия углекислого газа.....	307
ТРАНСКАПИЛЛЯРНЫЙ ОБМЕН ЖИДКОСТЕЙ.....	308
Физические механизмы, управляющие обменом жидкости.....	309
Модель капиллярного обмена.....	316
ОБРАЗОВАНИЕ ОТЕКА.....	319
Основные тезисы данной главы.....	321
Вопросы для повторения.....	322
Ответы на вопросы.....	323
Ответы на задачи.....	324
Литература.....	325

Глава 9

СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТАЯ СИСТЕМА КАК ЕДИНОЕ ЦЕЛОЕ, МЕХАНИЗМЫ АДАПТАЦИИ И ПАТОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ЗВЕНЬЯ РАЗВИТИЯ ЗАБОЛЕВАНИЙ.....326

Введение.....	327
ОСНОВЫ ФИЗИОЛОГИИ РЕАКЦИЯ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ НА ФИЗИЧЕСКУЮ НАГРУЗКУ.....	327
Механизмы реагирования сердечно-сосудистой системы на физическую нагрузку.....	328
Изменение функции сердечно-сосудистой системы во время физической нагрузки в состоянии устойчивого равновесия.....	331
Факторы, влияющие на реакцию сердечно-сосудистой системы на физическую нагрузку.....	334
ЗАБОЛЕВАНИЯ ПЕРИФЕРИЧЕСКИХ СОСУДОВ.....	338
Гемодинамические изменения при заболеваниях периферических артерий нижних конечностей.....	338
ИЗМЕНЕНИЕ ФУНКЦИИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ ВО ВРЕМЯ БЕРЕМЕННОСТИ.....	342
СИСТЕМА КРОВООБРАЩЕНИЯ ПЛОДА И ИЗМЕНЕНИЯ В НЕЙ ПОСЛЕ РОЖДЕНИЯ.....	343

АРТЕРИАЛЬНАЯ ГИПОТЕНЗИЯ И ШОК.....	347
Причины развития артериальной гипотензии	347
Циркуляторный шок	349
Компенсаторные механизмы при артериальной гипотензии.....	350
Механизмы декомпенсации после тяжелой и длительной артериальной гипотензии	355
Физиологические критерии терапевтического вмешательства	357
АРТЕРИАЛЬНАЯ ГИПЕРТЕНЗИЯ.....	358
Эссенциальная (первичная) артериальная гипертензия	359
Вторичная артериальная гипертензия	362
Физиологические критерии терапевтического вмешательства	365
СЕРДЕЧНАЯ НЕДОСТАТОЧНОСТЬ.....	366
Причины развития сердечной недостаточности	366
Противопоставление систолической и диастолической дисфункции.....	367
Системные компенсаторные механизмы при сердечной недостаточности.....	371
Ограничение физической нагрузки при сердечной недостаточности.....	374
Физиологические критерии терапевтического вмешательства	375
ПОРОКИ КЛАПАНОВ СЕРДЦА.....	377
Стеноз клапанов сердца.....	379
Недостаточность клапанов сердца	382
Основные тезисы данной главы	387
Вопросы для повторения	389
Ответы на вопросы.....	392
Ответы на задачи	395
Литература	396