

СОДЕРЖАНИЕ

Список сокращений 5 • Предисловие 9 • Благодарности 9

РАЗДЕЛ I **ФИЗИОЛОГИЯ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ**

- 1 Сердечно-сосудистая система: строение и функции 13**
Элементы сердечно-сосудистой системы 15 • Реакция сердечно-сосудистой системы на физические упражнения 20 • Резюме 21
- 2 Насосная функция сердца 22**
Общая анатомия сердца 22 • Сердечный цикл 24 • Петля взаимозависимости давления и объема 26 • Сердечный выброс 27 • Перераспределение фракции сердечного выброса 29 • Коронарное кровоснабжение 30 • Оценка структуры и функции сердца 33 • Резюме 38
- 3 Кардиомиоциты 39**
Микроскопическая анатомия кардиомиоцитов 39 • Электромеханическое сопряжение 43 • Механизмы сокращения 45 • Метаболические потребности 46 • Резюме 47
- 4 Электрическая активность сердца 48**
Ионная основа электрической активности 48 • Мембранный потенциал покоя 49 • Потенциал действия 49 • Проводящая система сердца 51 • Сердечный автоматизм 53 • Пейсмейкеры 54 • Контроль частоты сердечных сокращений 54 • Мозг и рецепторы в механизме контроля сердечного ритма 56 • Вариабельность сердечного ритма 57 • Резюме 60
- 5 Электрокардиограмма 62**
Значения электрокардиограммы 62 • Регистрация электрокардиограммы 64 • Измерение частоты сердечных сокращений 66 • Сердечные ритмы 67 • Блокады проводимости 72 • Гипертрофия желудочков 73 • Изменения сегмента ST (ишемия) 75 • Инфаркт миокарда 76 • Способы и условия регистрации электрокардиограммы 78 • Распространенные отклонения электрокардиограммы у спортсменов 79 • Резюме 79
- 6 Гемодинамика и периферическое кровообращение 81**
Градиент (перепад) давления 81 • Скорость кровотока 82 • Закон Пуазейля 82 • Кровоток 85 • Артериальное давление 88 • Пульсовые волны и их колебания 89 • Контроль просвета сосудов 90 • Рефлекторный контроль артериального давления и вазомоции 93 • Измерение артериального давления и пульсовой волны 96 • Резюме 98

7	Сосуды: строение и функции	100
	Строение кровеносных сосудов 100 • Сосудистая сеть 101 • Эндотелий 103 • Эндотелиальная регуляция сосудистого тонуса 106 • Гладкая мускулатура сосудов 109 • Оценка эндотелиальной и сосудистой функций 112 • Резюме 115	
8	Гемостаз: коагуляция и фибринолиз	116
	Повреждение сосудов 119 • Тромбоциты 119 • Коагуляция 123 • Фибринолиз — расщепление тромба 126 • <i>COVID-19</i> и острые тромботические осложнения 126 • Оценка гемостаза 127 • Резюме 128	
 РАЗДЕЛ II ВЛИЯНИЕ ТРЕНИРОВОК НА СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТУЮ СИСТЕМУ		
9	Реакция сердечно-сосудистой системы на аэробную нагрузку	131
	Реакции сердца 131 • Реакция сосудов 137 • Реакции гемостаза 151 • Резюме 156	
10	Адаптация сердечно-сосудистой системы к аэробным нагрузкам	158
	Адаптация сердца 158 • Адаптация сосудов 166 • Адаптация гемостаза 178 • Резюме 181	
11	Сердечно-сосудистый ответ при интенсивных тренировках на выносливость (функциональный тренинг)	183
	Реакции сердца 184 • Реакции сосудов 190 • Реакции гемостаза 198 • Резюме 201	
12	Адаптация сердечно-сосудистой системы к силовым тренировкам	202
	Адаптация сердца 202 • Адаптация сосудов 208 • Адаптация гемостаза 212 • Резюме 213	
	Глоссарий 214 • Список литературы 217 • Предметный указатель 239 • Об авторах 245	

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

1 ПМ	— один максимальный повтор	КФН	— коллапс после физической нагрузки
eNOS	— эндотелиальная синтаза оксида азота	ЛА	— легочная артерия
Hb	— гемоглобин	ЛЖ	— левый желудочек
Ht	— гематокрит	ЛП	— лекарственный препарат
MVC	— максимальное произвольное сокращение	ЛПНП	— липопротеины низкой плотности
t-PA	— активатор плазминогена тканевого типа	МЖП	— межжелудочковая перегородка
u-PA	— активатор плазминогена урокиназного типа	МКК	— малый круг кровообращения
VO_{2max}	— уровень максимального потребления кислорода	МП	— медицинская помощь
АВ	— атриовентрикулярный	МПК	— максимальное потребление кислорода
АГ	— артериальная гипертензия	МПП	— межпредсердная перегородка
АД	— артериальное давление	МРТ	— магнитно-резонансная томография
АДГ	— антидиуретический гормон	МТ	— масса тела
АД _{ср}	— среднее артериальное давление	НС	— нервная система
АДФ	— аденозиндифосфат	НЧ	— низкочастотный
анат.	— анатомический	ОНЧ	— колебания очень низкой частоты
АПФ	— ангиотензин-превращающий фермент	ОПСС	— общее периферическое сосудистое сопротивление
АТл	— антитело	ПАД	— пульсовое артериальное давление
АТФ	— аденозинтрифосфат	ПД	— потенциал действия
АЧТВ	— активированное частичное тромбопластиновое время	ПЖ	— правый желудочек
БКК	— большой круг кровообращения	ПЖС	— преждевременные сокращения желудочков
БЛНПГ	— блокада левой ножки пучка Гиса	ПСЭС	— предсердная экстрасистолия
БПНПГ	— блокада правой ножки пучка Гиса	ПТВ	— протромбиновое время
в/	— внутри	РААС	— ренин-ангиотензин-альдостероновая система
ВНС	— вегетативная нервная система	разл.	— различный
ВСР	— вариабельность сердечного ритма	РКИ	— рандомизированное клиническое исследование
ВЧ	— высокочастотный	РНК	— рибонуклеиновая кислота
ГК	— грудная клетка	СА	— синоатриальный
ГЛЖ	— гипертрофия левого желудочка	САД	— систолическое артериальное давление
ГМ	— головной мозг	СД	— сахарный диабет
ГПЖ	— гипертрофия правого желудочка	СДД	— среднее динамическое давление
ДАД	— диастолическое артериальное давление	СН	— сердечная недостаточность
ЖКТ	— желудочно-кишечный тракт	СНС	— симпатическая нервная система
ЗЛ	— здоровые люди	СПР	— саркоплазматический ретикулум
ИАП	— ингибитор активатора плазминогена	СРПВ	— скорость распространения пульсовой волны
ИБС	— ишемическая болезнь сердца	ССЗ	— сердечно-сосудистые заболевания
ИМ	— инфаркт миокарда	ССС	— сердечно-сосудистая система
ИМТ	— индекс массы тела	ССУ	— синдром слабости синусового узла
КА	— коронарная артерия	ТТ	— температура тела
КДО	— конечно-диастолический объем	ТФ	— тканевой фактор
КДР	— конечно-диастолический размер	ТЭЛА	— тромбоэмболия легочной артерии
кл.	— клетка	ТЭО	— тромбоэмболические осложнения
КСО	— конечно-систолический объем	УЗДС	— ультразвуковое дуплексное сканирование
КСР	— конечно-систолический размер	УЗИ	— ультразвуковое исследование

6 ■ Список сокращений

ФВ — фракция выброса
физиол. — физиологический
ФН — физическая нагрузка
ФП — фибрилляция предсердий
цГМФ — циклический гуанозинмонофосфат

ЦНС — центральная нервная система
ЧСС — частота сердечных сокращений
ЭКГ — электрокардиограмма
ЭОС — электрическая ось сердца
ЭхоКГ — эхокардиограмма

РАЗДЕЛ I

ФИЗИОЛОГИЯ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ

ССС объединяет в себе сердце, сосудистую сеть и кровь. Этот комплекс органов реагирует на ФН совокупно, путем сложных взаимодействий, что позволяет удовлетворять метаболические потребности работающих мышц, сохранять необходимый уровень саморегуляции (гомеостаза для функционирования организма и его своевременной реакции на потенциальные угрозы).

Раздел I — это краткое объяснение структуры и функций каждого элемента ССС (сердца,

сосудов и крови), где значительное внимание уделено работе кл., составляющих орган, и контролю их функций. В разделе II описаны процессы комплексной реакции элементов ССС при выполнении аэробных и силовых упражнений, а также при следовании режиму тренировок. Полезно также помнить и о совокупной реакции на стресс, вызванной физическими упражнениями. Эти моменты освещаются на протяжении каждой главы всего раздела I.

СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТАЯ СИСТЕМА: СТРОЕНИЕ И ФУНКЦИИ

ЦЕЛИ ОБУЧЕНИЯ

- Описать анатомию сердца.
- Описать ток крови по малому кругу кровообращения (МКК) и большому кругу кровообращения (БКК), ток крови в сердце, а также изменения концентрации кислорода в крови в зависимости от отдела кровеносной системы.
- Определить максимальное потребление кислорода (МПК) и его связь с сердечным выбросом.
- Перечислить типы артерий и другие виды сосудов, описать особенности и характеристики их строения.
- Объяснить, как структурные изменения стенок сосудов влияют на их функцию.
- Описать разл. компоненты крови и их пропорции друг к другу.
- Определить форменные элементы в крови и роль, которую они играют в ССС.

ССС — удивительный механизм, который сотни лет вызывает неподдельный интерес, подталкивая к серьезным исследованиям клиницистов и ученых. В древние времена сердце рассматривали какместилище наших эмоций, и даже сегодня образ сердца связан с понятием чувств. В 1628 г. *William Harvey* предположил, что сердце перекачивает кровь по замкнутому сосудистому контуру (*Fye*, 2006). Сегодня каждый старшеклассник хотя бы упрощенно представляет роль ССС в поддержании жизни. Но исследователи ежедневно делают новые захватывающие открытия об этом комплексе органов и функций. Недавние работы в основном сосредоточены на клеточных и молекулярных аспектах сердечно-сосудистой функции.

ССС состоит из трех взаимно связанных и хорошо скоординированных структур: сердца, сосудистой сети и крови. Вместе эти элементы обеспечивают основную функцию ССС: доставку кислорода и питательных веществ к кл. организма и выведение продуктов жизнедеятельности из кл. ССС выполняет множество функций, которые можно разделить на несколько основных и иногда пересекающихся категорий следующим образом.

1. Транспорт и доставка.

- Газообмен — транспорт и обмен дыхательных газов (кислорода и углекислого газа).
- Доставка и обмен питательных веществ и продуктов жизнедеятельности.
- Транспорт гормонов и других химических сигналов.

2. Гомеостаз (саморегуляция).

- Поддержание водно-солевого обмена.
- Поддержание *pH*-баланса.
- Поддержание теплового баланса.
- Регулирование АД.

3. Защита.

- Предотвращение кровопотери через механизм гемостаза.
- Профилактика инфекции: лейкоциты и лимфатическая ткань.

Это важнейшие задачи организма, и они выполняются благодаря тесным функциональным взаимосвязям между ССС и другими основными механизмами в организме. Во взаимодействие вовлечены нервная, дыхательная, эндокринная, иммунная, пищеварительная, мочевыделительная, костно-мышечная и покровная системы. Как видно

на схеме, представленной на рис. 1.1, сердце обеспечивает циркуляцию крови в МКК и БКК. МКК доставляет частично дезоксигенированную кровь из правого желудочка (ПЖ) в легочные капилляры, где она насыщается кислородом и возвращается в левое предсердие. МКК поддерживает важную взаимосвязь между ССС и дыхательной системой. Дыхательная система отвечает за доставку кислорода в альвеолы, кислород диффундирует в кровь по тонкостенным кровеносным капиллярам, а затем уже сердце обеспечивает подачу насыщенной кислородом крови к кл. организма. Аналогичным образом ССС отводит и углекислый газ. Выбрасываясь на клеточном уровне, он поступает в легочные капилляры и оттуда диффундирует в легкие, откуда выделяется при выдохе. Система кровообращения распределяет кровь по всем основным системам и тканям организма, а также активно взаимодействует с пищеварительной, мочевыделительной и покровной системами для выполнения основных сердечно-сосудистых функций и поддержания работоспособности этих механизмов.

ССС выполняет сразу несколько важных функций в гомеостатическом балансе: поддержание адекватного артериального давления (АД) в тканях организма и обеспечение оптимального уровня кислорода; поддержание баланса pH в определенных рамках; терморегуляцию за счет образования пота (получаемого из плазмы) и за счет усиления кожного кровотока; регуляцию метаболизма, особенно в отношении уровня глюкозы в крови.

Способность крови свертываться и предотвращать кровопотерю при повреждении кровеносного сосуда относится к важнейшей функции всей ССС — защитной. Но образование тромбов без необходимости может представлять угрозу для жизни. Эндотелий сосудов создает противотромботическую среду в условиях покоя, но может быстро активироваться, когда разрушается эндотелиальная выстилка. Лейкоциты помогают управлять иммунными реакциями и активно взаимодействуют с белками, переносимыми с кровью: так возникает воспалительная реакция и защита от внешних патогенов.

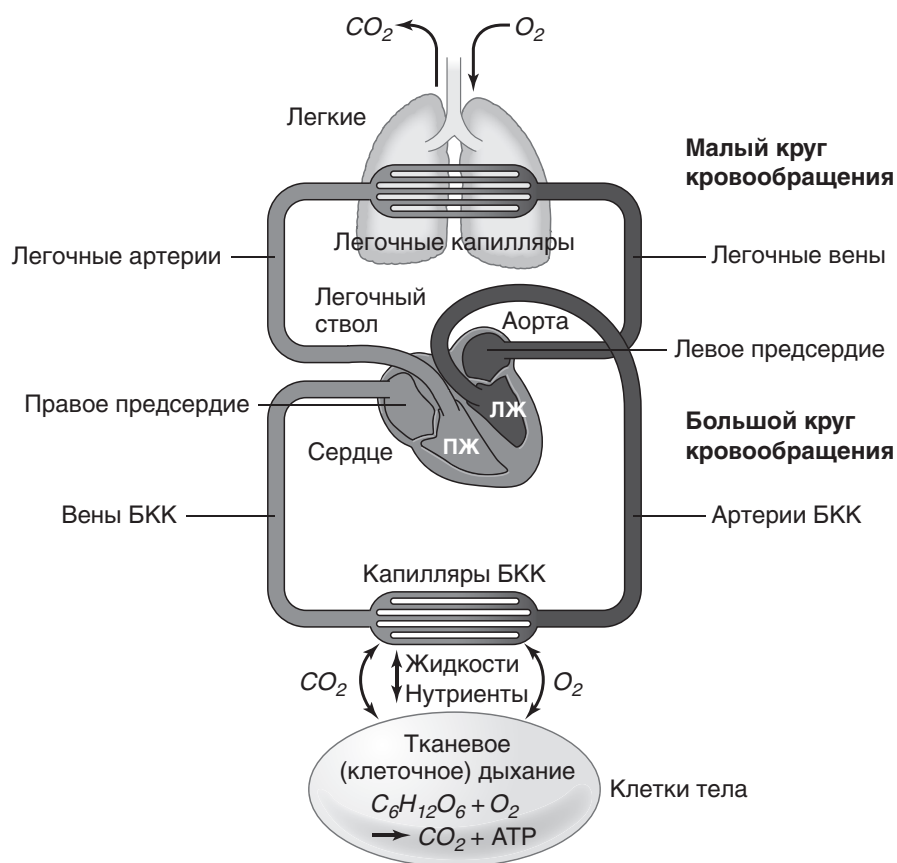


Рис. 1.1. Схема большого и малого круга кровообращения. Малый круг кровообращения доставляет кровь к легочным капиллярам, которые окружают альвеолы, чтобы удалять углекислый газ и насыщать кислородом гемоглобин. Большой круг кровообращения доставляет насыщенную кислородом кровь в системные капилляры, чтобы обеспечить кл. организм кислородом и вывести из них углекислый газ

ЭЛЕМЕНТЫ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ

В этой главе кратко рассматриваются структура и функции составляющих ССС, что дает наглядное представление о том, в какой степени взаимодействия должны работать все элементы, чтобы достигать результатов, описанных выше. В следующих главах строение и функции каждого составляющего компонента рассмотрены более подробно, с пояснениями того, как именно происходит реакция на стресс, связанный с физическими упражнениями.

СЕРДЦЕ

ССС включает сердце, сосудистую сеть и кровь. Сердце выступает как насос для системы кровообращения, обеспечивая также силу сокращения, необходимую для переноса крови к разл. органам (см. строение сердца на рис. 1.2). Предсердия служат приемными камерами. Правое предсердие получает кровь из верхней полой вены и нижней полой вены, а левое — насыщенную кислородом кровь из легочных вен. Правый желудочек перекачивает кровь в легкие (МКК), а левый желудочек (ЛЖ) отправляет кровь по всему телу (БКК). Мышечная стенка сердца называется миокардом,

что в переводе с древнегреческого означает «сердечная мышца». Правильно работающие клапаны сердца обеспечивают односторонний ток крови. Сердце — относительно небольшой орган, весящий ~300–350 г у здоровых взрослых. В состоянии покоя сердце получает ~4% кровотока и ~10% общего потребления кислорода.

Сердечный выброс¹ — количество крови, выталкиваемое из желудочков сердца за 1 мин. Этот показатель говорит о способности сердца перекачивать кровь для удовлетворения потребностей организма поминутно. Сердечный выброс определяется произведением частоты сердечных сокращений (ЧСС, сокращений в минуту) и ударного объема крови (выбрасываемого за 1 сокращение). В естественных условиях покоя сердечный выброс составляет ~5 л/мин, что в значительной степени зависит от размера тела. Но это значение может быстро изменяться, реагируя на новые потребности организма. Например, во время интенсивных физических упражнений производительность сердца может увеличиться в 5–7 раз. Это необходимо для удовлетворения метаболических потребностей при активной мышечной нагрузке.

¹ В русскоязычной профессиональной литературе чаще используется термин «минутный объем кровообращения».

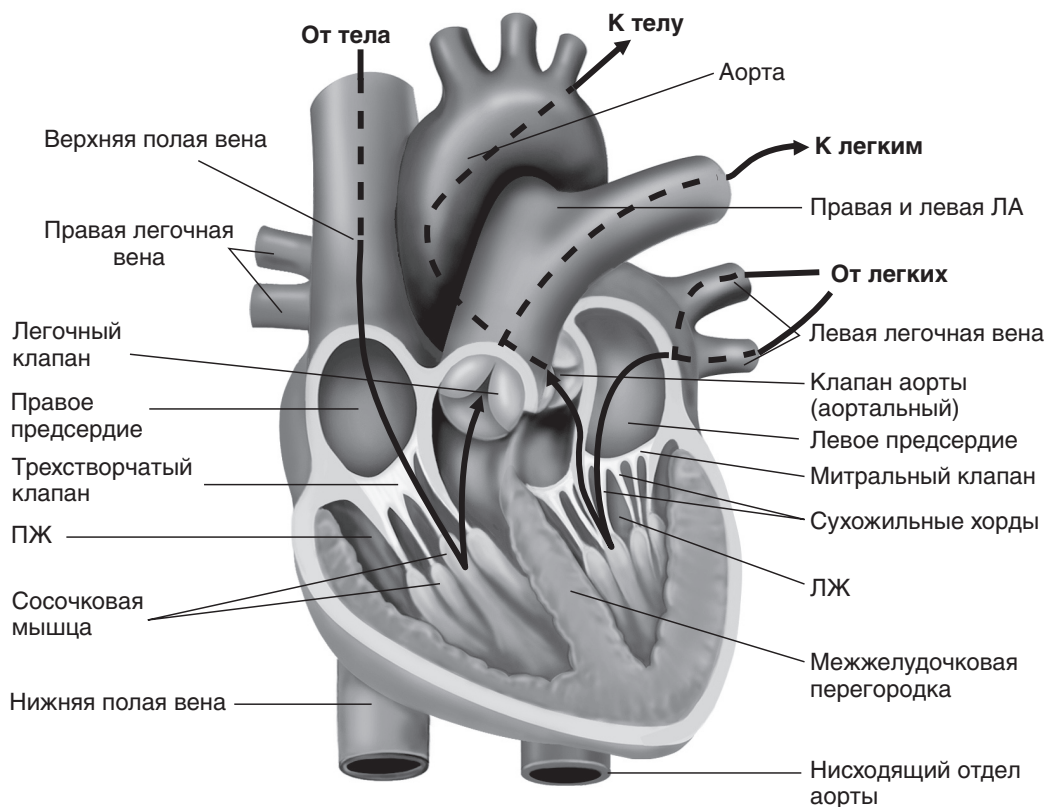


Рис. 1.2. Структура сердца. Клапаны играют важную роль в обеспечении одностороннего движения крови через сердце

СОСУДЫ

Сосуды — эластичные трубчатые каналы, они отвечают за распределение крови, кислорода, питательных веществ и множества других соединений, которые кровь транспортирует по всему организму. На рис. 1.3 представлено упрощенное схематическое изображение циркуляции крови через сердечно-сосудистую сеть. Хотя кровообращение в большинстве органов происходит параллельно, печеночное и почечное кровоснабжение осуществляется последовательно. Относительное распределение крови, поступающей в каждую из систем кровообращения, тщательно контролируется механизмами констрикции (сужения) или дилатации (расширения) сосудов в форме артериол — они снабжают органы. Степень сокращения и расслабления гладкой мускулатуры в стенках сосудов определяется единой системой нейрогуморально-гормонально-барьерной регуляции в соответствии с текущими метаболическими потребностями тканей.

Сосуды имеют сложное строение, это динамичные органы, которые постоянно изменяют свой диаметр (просвет), чтобы регулировать кровоток в соответствии с потребностями тканей в питании. Стенка сосуда также высвобождает ряд химических медиаторов, которые участвуют в свертывании крови и запуске воспалительной реакции. Внутренняя выстилка кровеносных, лимфатических сосудов — эндотелий. Он играет решающую роль в перемещении веществ между сосудистым пространством и подлежащей тканью, регулируя сосудистый тонус (вазоконстрикция и вазодилатация), свертывание крови и фибринолиз, а также воспалительные реакции. Недавняя пандемия *COVID-19* продемонстрировала важность эндотелия. Множество клинических нарушений при тяжелых исходах *COVID-19* были опосредованы реакциями эндотелия, включая высвобождение воспалительных цитокинов (цитокиновый шторм), повышенную проницаемость сосудов, приводящую к застойным явлениям в разл. органах, и повышенный потенциал свертывания крови (микротромбы). Может пострадать эндотелий сосудов любого органа, и этим можно объяснить многочисленные клинические исходы.

› ОСНОВНЫЕ ТЕЗИСЫ

ССС — сложная система органов, состоящая из сердца, сосудистой сети и крови. СССР реагирует на физические упражнения, адаптируясь к метаболическим потребностям работающих мышц.

Скорость и давление крови в сосудистой системе

На рис. 1.4 отражены скорость циркуляции, АД и сопротивление кровотоку в системе

кровообращения в зависимости от площади поперечного сечения сосудов. У аорты (самой большой артерии в организме) площадь поперечного сечения больше, чем у обычных артерий. А площадь поперечного сечения артерии больше, чем у артериолы,

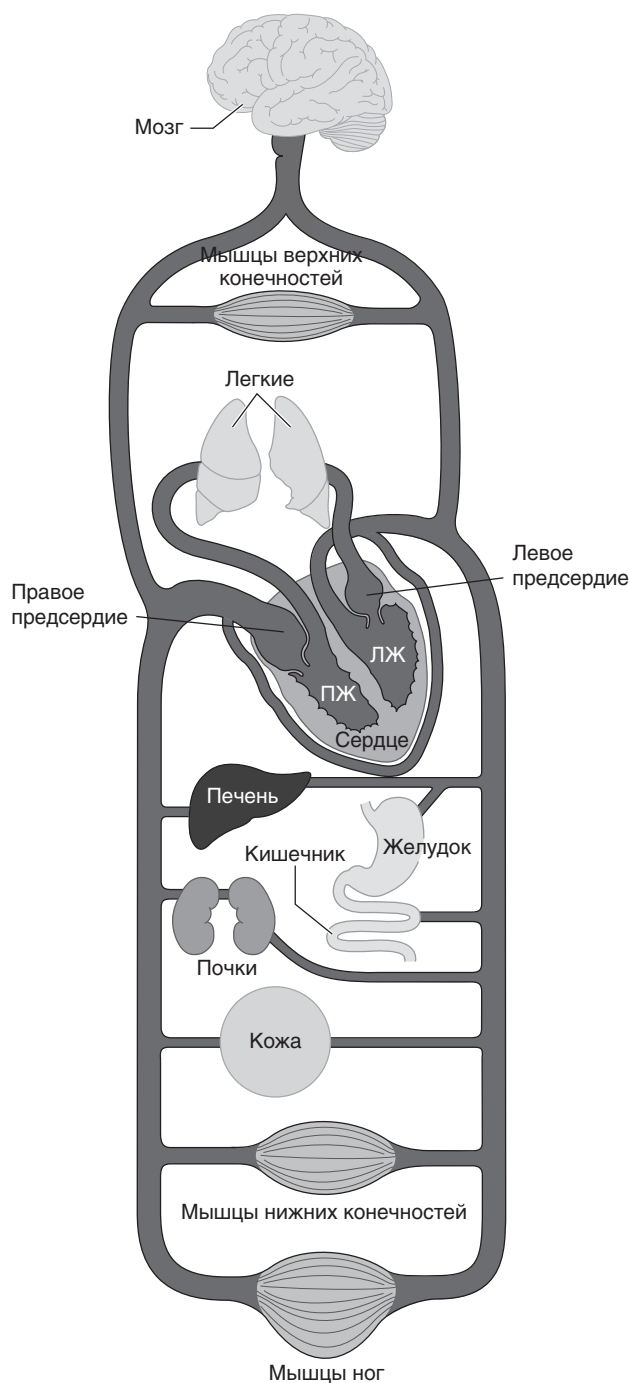


Рис. 1.3. Схема основных путей сердечно-сосудистой системы. Кровообращение в большинстве системных органов происходит параллельно, но печеночное и почечное кровоснабжение осуществляется последовательно. ПЖ — правый желудочек; ЛЖ — левый желудочек

Максимальное потребление кислорода (VO_{2max})

Этот параметр важен при оценке общей физической подготовки человека. МПК также относится к функциональным показателям работы всей ССС. МПК отражает способность ССС доставлять кровь (и содержащийся в ней кислород) к активной мышце и способность этой мышцы использовать доставляемый кислород. Подобная задача требует увеличения общего количества крови, перекачиваемой сердцем (увеличения сердечного выброса), и перераспределения кислорода из крови таким образом, чтобы наибольший процент направлялся в мышцу под нагрузкой и меньший процент приходился

на мышцу в состоянии покоя и на органы, которым в это время не требуется много кислорода [например, почки и желудочно-кишечный тракт (ЖКТ)]. Сердечный выброс в покое составляет ~5 л/мин, во время максимальной нагрузки он может увеличиваться до значений >30 л/мин. Также впечатляет то, как именно сердечный выброс перераспределяется во время тренировки. В состоянии покоя ~20% сердечного выброса (или 1 л/мин) приходится на скелетные мышцы. Но во время максимальной физической активности на эту же часть мускулатуры направляется уже ~90% сердечного выброса (или 27 л/мин).

а у артериолы больше, чем у капилляра. Но учитывая обширное разветвление сосудистой системы, наибольшая общая площадь поперечного сечения наблюдается в сети капилляров именно за счет их наибольшей распространенности в организме. Самая высокая скорость кровотока — в крупных артериях из-за силы сокращения желудочков и из-за отсутствия сосудистого сопротивления кровотоку. АД в крупных (магистральных) артериях пульсирующее из-за чередующихся периодов сокращения (систола) и расслабления (диастола) миокарда. Хотя диастолическое давление в желудочках падает почти до 0 мм рт.ст., в магистральных артериях оно обычно не опускается ниже 70 мм рт.ст. Это происходит из-за давления, создаваемого при сжатии стенок сосудов во время диастолы (эффект Винкесселя). Резкое снижение АД и скорости кровотока происходит при поступлении крови в артериолы (сосудистое сопротивление). Наиболее низкая скорость кровотока — в капиллярах из-за их большой площади поперечного сечения. Это свойство делает капилляры наиболее эффективными из всех

сосудов для газообмена. Давление в капиллярах тоже низкое, что помогает сохранять целостность стенок этих мелких сосудов, которые повредились бы при высоком давлении. Скорость кровотока увеличивается в венах по мере уменьшения общей площади поперечного сечения сосудов. Но давление в венозной сети кровеносной системы очень низкое, поскольку здесь кровь циркулирует довольно далеко от сократительной силы сердца. Низкий порог давления в венах не мог бы обеспечить адекватный возврат венозной крови к сердцу. Именно поэтому усилению венозного кровотока способствуют односторонние клапаны в просвете этих сосудов, а также механизм мышечного насоса (мышечно-венозная помпа) вместе с работой скелетных мышц.

Функциональная классификация сосудов

Кровеносные сосуды классифицируют по их функциональности, которая определяется структурными характеристиками сосудистой стенки. В табл. 1.1 приведены краткие сведения

Таблица 1.1. Сравнение структуры кровеносных сосудов

	Артерии эластического типа	Артерии мышечного типа	Артериолы	Капилляры	Венулы	Вены
Внутренний диаметр	1,5 см	0,4–0,6 см	30 мкм	9 мкм	20 мкм	0,5 см
Толщина стенки	1 мм	1 мм	6 мкм	0,5 мкм	1 мкм	0,5 мм
ПРИМЕРНАЯ СТРУКТУРА СТЕНКИ СОСУДА (%)						
Эндотелиальная ткань	5	5	10	95	20	10
Эластичная ткань	60	10–15	10			5
Гладкая мускулатура	20–30	65	60		20	30
Волокнистая (фиброзная) ткань	15–25	20	20	5	60	60

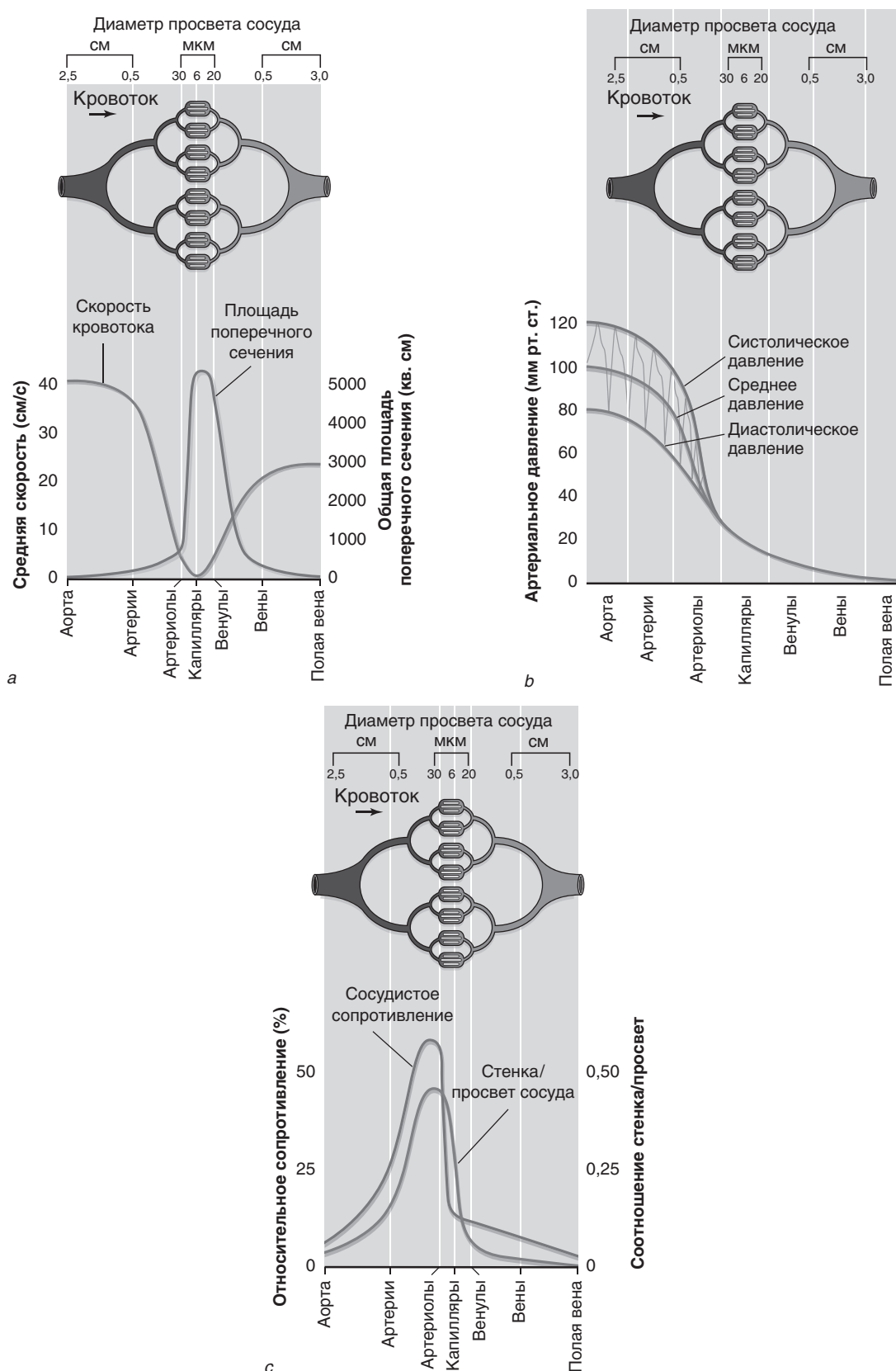


Рис. 1.4. Схема (a) площади поперечного сечения сосуда и скорости кровотока, (b) артериальное давление, (c) общее периферическое сопротивление сосудов. Расчет всего объема сердечного выброса в минуту. Давление в артериях пульсирующее, но становится постоянным по мере того, как кровь движется по артериолам (сосудам сопротивления)

о диаметре, толщине стенок и составе разл. типов сосудов.

Артерии эластического типа (центральные артерии) — самые крупные из сосудов тела (аорта и подвздошные артерии). Также они крайне растяжимы из-за большого количества эластина в их средней оболочке. Артерии мышечного типа (проводящие артерии) включают большинство артерий, которые студенты изучают на уроках анатомии: это лучевые, локтевые, подколенные, церебральные артерии и КА.

Артерии мышечного типа названы так из-за большого объема гладкой мускулатуры в срединном слое оболочек. Расслабление гладкой мускулатуры вызывает расширение сосудов и увеличение притока крови (при условии, что давление остается постоянным). Это наблюдается во время тренировки, когда окружающие мышечные артерии и артериолы гладкие мышцы, снабжающие скелетные мышцы, расслабляются, что приводит к увеличению притока крови к активным скелетным мышцам.

› ОСНОВНЫЕ ТЕЗИСЫ

Несмотря на то что отдельные капилляры чрезвычайно малы, общая площадь поперечного сечения всех капилляров довольно велика. Кровоток по капиллярам протекает медленнее, чем по артериям или венам, что облегчает газообмен.

Терминальные артерии и артериолы относятся к сосудам сопротивления (резистивным), поскольку оказывают обратное кровотоку действие на довольно больших участках всей сосудистой сети. Сосуды сопротивления в первую очередь представлены артериолами: этот тип сосудов отвечает за определение местного кровотока, расширяя и сужая сосуды, чтобы выстроить баланс между местным кровотоком и локальными метаболическими потребностями.

Обменные сосуды — сеть, состоящая в основном из капилляров и в меньшей степени мельчайших сосудов венозной сети — венул. Обменные сосуды выполняют основную функцию ССС: обмен газов и метаболитов. Такие процессы обмена происходят через стенку капилляра, и способствуют этому характеристики сети обменных сосудов:

- большая общая площадь поперечного сечения всех капилляров;
- тонкая стенка сосуда, состоящая из одного слоя эндотелия, который обеспечивает незначительное сопротивление диффузии;
- сниженная скорость кровотока, что позволяет капиллярам полноценно производить обменные процессы.

В дополнение к обмену газов и питательных веществ через стенку капилляра эти крошечные сосуды также обеспечивают водно-солевой обмен, что помогает поддерживать баланс жидкости.

Емкостные сосуды включают венулы и вены. Они названы так по характеристике, указывающей на присутствие в них ~2/3 всего объема крови в любой момент времени. Возможность емкостных сосудов вмещать большие объемы крови обусловлена характеристиками их стенок. У венул и вен стенка тонкая и включает медию (среднюю оболочку) с небольшим объемом гладкой мускулатуры и коллагена. Вследствие своей тонкой стенки емкостные сосуды могут легко расширяться или сужаться, что позволяет реализовать функцию резервуара для крови в венозной сети. Иннервация вен осуществляется суживающими нервными волокнами, что позволяет активно контролировать объем крови, находящейся в венозной системе.

КРОВЬ

Кровь относится к соединительной ткани, а состоит из плазмы и находящейся в ней взвеси форменных элементов. Как показано на рис. 1.5, примерно от 40 до 45% объема крови приходится на форменные элементы, включая эритроциты (красные кровяные тельца; *Red Blood Cells* — *RBC*), лейкоциты (белые кровяные тельца; *White Blood*



Рис. 1.5. Компоненты крови. Кровь состоит из плазмы и форменных элементов: эритроцитов, лейкоцитов и тромбоцитов, но эритроциты составляют основную массу всех форменных элементов. Перепечатано с разрешения из: J.W. Wilmore, D.L. Costill, W.L. Kenney. *Physiology of exercise and sport*, 4th ed. (Champaign, IL: Human Kinetics). 2008:140

Cells — WBC) и тромбоциты. Остальной объем крови, приблизительно от 55 до 60%, составляет плазма.

Форменные элементы

Эритроциты — небольшие двояковогнутые диски (толщиной ~2,4 мкм и диаметром 8 мкм), которые отвечают за транспортировку кислорода из альвеол легких в системные капилляры, где он диффундирует в кл. Эритроциты состоят в большей степени из гемоглобина (*Hb*) — сложного белка, который может связывать и транспортировать кислород.

Лейкоциты составляют небольшую часть (~1%) в общей массе форменных элементов. Это белые кровяные тельца, которые играют решающую роль в защитных силах организма, иммунной функции и воспалении. Существует пять типов лейкоцитов, каждый из них обладает специфическими, а иногда и неспецифическими функциями.

Тромбоциты («пластинки») — очень маленькие фрагменты кл. крови (2–3 мкм), однако играют решающую роль в иницировании реакции коагуляции. Тромбоциты также взаимодействуют с эндотелиальной выстилкой кровеносных сосудов, участвуют в патологическом процессе образования атеросклеротических бляшек. Тромбоциты формируются из очень крупных кл. мегакариоцитов,

которые распадаются на мелкие фрагменты и циркулируют в крови уже в виде тромбоцитов.

› ОСНОВНЫЕ ТЕЗИСЫ

Кровеносные сосуды имеют разл. характерные особенности по всей сосудистой сети, а их функциональность определяется структурой каждого вида сосудов.

Плазма

Это жидкая часть крови, отвечает за транспортировку и распределение форменных элементов, а также гормонов, питательных и иных веществ. Плазма крови состоит в основном из воды с долей сухого остатка (~8–10%), содержащего разл. органические и неорганические вещества (табл. 1.2).

› РЕАКЦИЯ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ НА ФИЗИЧЕСКИЕ УПРАЖНЕНИЯ

Физические упражнения создают повышенную потребность в снабжении работающих мышц кислородом. Это необходимо для увеличения выработки аденозинтрифосфата (АТФ) для поддержания непрерывного сокращения мышц. В то же время существует необходимость удаления увеличившегося

Таблица 1.2. Состав плазмы крови

Составная часть	Описание и функции
Вода	90% объема плазмы; растворяющая среда, взвешенное состояние (супендирование); поглощает тепло
РАСТВОРЕННЫЕ ВЕЩЕСТВА	
Белки плазмы: • Альбумин. • Глобулины. • Альфа, бета. • Гамма. • Фибриноген	8% (по весу) от объема плазмы; способствуют повышению осмотического давления и помогают поддерживать баланс жидкости; специфические функции характерны для каждого белка. 60% белков плазмы; поддержание осмотического давления. 36% белков плазмы. Транспортные белки, связываются с липидами, ионами металлов и жирорастворимыми витаминами. Антитела (АтЛ), вырабатываемые иммунными клетками при иммунном ответе. 4% белка плазмы; образует фибриновые нити сгустка крови
Небелковые азотистые вещества	Побочные продукты клеточного метаболизма: мочевины, мочевая кислота, креатинин и соли аммония
Нутриенты (органические вещества)	Соединения, всасываемые из пищеварительного тракта
Электролиты	Катионы и анионы: помогают поддерживать осмотическое давление плазмы и pH крови
Дыхательные газы	Кислород и углекислый газ: растворены в плазме в виде бикарбонат-иона или CO ₂ , или связаны с Hb в эритроцитах
Гормоны	Химические сигналы, переносимые с кровью

объема углекислого газа, который вырабатывается в результате усиленного клеточного дыхания. Для достижения этих целей необходимы два регулирующих механизма:

- ЧСС и сила сокращения увеличиваются, что приводит к значительному увеличению сердечного выброса.
- Сердечный выброс перераспределяется в соответствии с регуляцией просвета кровеносных сосудов в разных частях тела: диаметр изменяется так, чтобы в работающие мышцы поступало больше крови, а в неактивные — меньше.

Эти изменения происходят в ответ на реакции в кл. миокарда и гладкой мускулатуры, окружающих кровеносные сосуды. В свою очередь, эти мышечные кл. могут реагировать на нервные стимулы (симпатическая нервная система — СНС), гормональную регуляцию (например, катехоламины), локальные химические процессы (включая оксид азота) и механические действия (например, степень растяжения).

В дополнение к корректировкам, способствующим увеличению объема доставляемого кислорода и удалению отходов, ССС приспосабливается к ФН, чтобы поддерживать гомеостаз (саморегуляцию) и повышать способность организма справляться с угрозой (инфекцией или кровотечением). При реализации этих потребностей происходит следующая активность:

- повышается теплоотдача (из-за усиления потоотделения и кожного кровотока);
- повышается уровень циркулирующих лейкоцитов;
- повышается коагуляционный и фибринолитический потенциал.

» РЕЗЮМЕ

ССС состоит из сердца, сосудистой сети и крови. ССС реагирует на физические упражнения сложным и взаимозависимым образом, что позволяет ей удовлетворять метаболические потребности работающих мышц, сохранять необходимый уровень гомеостаза для функционирования организма, реагировать на потенциальные угрозы для организма. Более подробно механизмы реакций на тренировки описаны в продолжении книги.

Другие главы этого раздела содержат подробную информацию о структуре и функциях каждого из элементов ССС (сердце, сосуды и кровь), при этом значительное внимание уделено тому, как функционируют кл. органов и как контролируются их функции. В разделе II книги описывается комплексная реакция всех компонентов ССС — при реакциях на аэробные упражнения и силовые нагрузки, а также на программы тренировок. Полезно помнить о комплексной реакции на стресс, которым для организма становятся физические упражнения. Это освещается в каждой главе.

ПРОВЕРОЧНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Перечислите три основные функции ССС.
2. Опишите путь эритроцитов, когда они проходят через сердце, начиная и заканчивая системными артериями.
3. Перечислите пять ветвей сосудистой системы, через которые проходит кровь при движении от аорты к полым венам, и объясните, как изменяется скорость крови, общее периферическое сопротивление сосудов (ОПСС) и давление для каждой из них.
4. Каковы характеристики артерий эластического и мышечного типа и какие функции они выполняют?
5. Какие сосуды относятся к резистивным (сосудам сопротивления), обменным и емкостным и почему?

НАСОСНАЯ ФУНКЦИЯ СЕРДЦА

ЦЕЛИ ОБУЧЕНИЯ

- Описать общую анатомию сердца.
- Перечислить четыре фазы сердечного цикла, описать положение сердечных клапанов, изменения давления и объема желудочков на протяжении каждой фазы.
- Описать петлю взаимозависимости давления и объема и ее возможные изменения при увеличении объема желудочка.
- Объяснить факторы, влияющие на ударный (систолический) объем.
- Описать основные факторы, влияющие на сердечный выброс.
- Указать основные коронарные артерии.
- Объяснить, как коронарный кровоток и потребление кислорода влияют на доставку кислорода к миокарду.
- Оценить разл. показатели сердечной функции.

Вопреки всем романтическим значениям, связанным с сердцем, по сути этот орган — двусторонний мышечный насос, который отвечает за циркуляцию крови по всему телу. Верхние камеры сердца — предсердия — получают кровь из венозной сети. Желудочки обеспечивают сокращения для перекачки крови по всей системе кровообращения, при этом ПЖ перекачивает кровь через МКК, а ЛЖ — через БКК. Объем крови, выбрасываемой из каждого желудочка за единицу времени (л/мин), называется сердечным выбросом. Другое название этого термина — минутный объем крови — количество крови, прокачиваемое сердцем через систему кровообращения за 1 мин. Сердечный выброс обеспечивает доставку крови к тканям организма и тесно связан с их метаболическими потребностями.

› ОБЩАЯ АНАТОМИЯ СЕРДЦА

На рис. 2.1 показано положение сердца в грудной полости. Соединительнотканый каркас сердца — его основа с фиброзно-сухожильными кольцами, треугольными пластинками и перегородками, так называемый мягкий скелет. Задача соединительнотканного каркаса — обеспечить необходимую структуру, основу для сердца. Он удерживает вместе предсердия и желудочки, создает волокнистую

структуру вокруг сердечных клапанов. Фиброзное кольцо также отделяет предсердия от желудочков и препятствует передаче электрических сигналов из предсердий непосредственно в желудочки. Верхушка сердца образована нижними участками желудочков.

Предсердия — верхние принимающие камеры сердца, в которые кровь поступает из полых вен (правое предсердие) и легочной вены (левое предсердие), как показано на рис. 2.2. В отличие от предсердий, благодаря своим толстым стенкам желудочки перекачивают кровь в артерии, выступая как мышечные насосы, генерируя силу, необходимую для выброса крови из сердца и ее распределения по сосудистой системе. Стенка ЛЖ обычно примерно в 3 раза толще стенки ПЖ из-за большего давления, которое должен создавать ЛЖ, чтобы прокачивать кровь через весь БКК.

При схематическом рассмотрении поперечного сечения сердца видно, что желудочки имеют разную форму (см. рис. 2.2). ПЖ меньше, а усилие при выбросе создается, когда передняя стенка желудочка прижимается к межжелудочковой перегородке (МЖП). Анат. строение ПЖ позволяет его тонким стенкам с минимальным сокращением выбрасывать большой объем крови при низком венозном давлении (отток). ЛЖ крупнее размером и имеет