

Геродот Эллинас • Кай Маттес  
Валид Альраяши • Айкут Бильге

# КЛИНИЧЕСКАЯ АНЕСТЕЗИОЛОГИЯ В ПЕДИАТРИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ

РУКОВОДСТВО ДЛЯ ВРАЧЕЙ

Перевод с английского под редакцией  
профессора С.М. Степаненко



Москва  
ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ГРУППА  
«ГЭОТАР-Медиа»  
2023

# Содержание

Предисловие к изданию на русском языке .....	10
Предисловие к изданию на английском языке ...	11
Авторы .....	13
Список сокращений и условных обозначений ...	18

## I. Базовые науки в педиатрической анестезиологии

<b>1. Физиологические аспекты</b> .....	23
Основные положения .....	23
Центральная и вегетативная нервная система .....	23
Внутриутробная анатомия и физиология ...	25
Основные положения .....	28
Список литературы .....	29
<b>2. Анатомические особенности</b> .....	30
Основные положения .....	30
Череп .....	30
Верхние дыхательные пути .....	31
Размеры тела .....	36
Позвоночник .....	36
Список литературы .....	36
<b>3. Мониторинг, дыхательные контуры и наркозные аппараты</b> .....	37
Основные положения .....	37
Мониторинг .....	37
Дыхательные системы и наркозные аппараты .....	41
Список литературы .....	45

## II. Фармакология

<b>4. Фармакологические особенности в неонатологии</b> .....	49
Основные положения .....	49
Фармакокинетика .....	49
Фармакодинамика .....	55
Список литературы .....	57
<b>5. Анальгетики</b> .....	58
Основные положения .....	58
Фармакокинетика созревания .....	59
Заключение .....	74
Список литературы .....	74
<b>6. Гипнотики</b> .....	75
Основные положения .....	75
Введение .....	75
Пропофол .....	76

Кетамин .....	77
Этоmidат .....	78
Дексмететомидин .....	79
Бензодиазепины .....	80
Барбитураты .....	81
Метогекситал .....	82
Список литературы .....	82
<b>7. Миорелаксанты</b> .....	83
Основные положения .....	83
Физиология нервно-мышечного соединения .....	83
Нервно-мышечная передача у новорожденных .....	86
Нервно-мышечный мониторинг .....	86
Паттерны стимулов .....	86
Механизм действия миорелаксантов .....	88
Фармакологические свойства миорелаксантов .....	89
Показания и противопоказания для применения сукцинилхолина <sup>®</sup> у младенцев и подростков .....	91
Недеполяризующие миорелаксанты .....	92
Недеполяризующие Миорелаксанты средней продолжительности действия .....	94
Лекарственные взаимодействия и факторы, влияние на нервно-мышечную передачу .....	96
Антагонисты миорелаксантов .....	96
Список литературы .....	98
<b>8. Местные анестетики</b> .....	99
Основные положения .....	99
История применения местных анестетиков .....	99
Механизм действия .....	100
Фармакокинетика .....	103
Список литературы .....	110
<b>9. Вазоактивные препараты</b> .....	111
Основные положения .....	111
Список литературы .....	118

## III. Наркозная практика

<b>10. Предоперационное обследование</b> .....	121
Основные положения .....	121
Введение .....	121

Психологическая подготовка .....	122	<b>15. Анестезия при офтальмологических операциях .....</b>	<b>183</b>
История болезни .....	122	Основные положения .....	183
Тестирование на беременность .....	123	Анатомия глаза .....	183
Рекомендации по голоданию .....	123	Физиология глаза .....	185
Особые замечания .....	125	Глазные болезни и операции .....	185
Болезни центральной нервной системы ..	128	Анестезия при глазных операциях .....	189
Гематологические болезни .....	129	Список литературы .....	190
Эндокринные расстройства .....	130	<b>16. Анестезия при отоларингологических операциях .....</b>	<b>191</b>
Список литературы .....	134	Мириготомия с размещением трубки ....	191
<b>11. Медикаменты, используемые перед операцией .....</b>	<b>135</b>	Основные положения .....	191
Основные положения .....	135	Введение .....	191
Введение .....	135	Стволовые слуховые вызванные потенциалы .....	196
Премедикация .....	136	Основные положения .....	196
Бензодиазепины .....	137	Основные положения .....	197
Барбитураты .....	139	Основные положения .....	202
Небарбитуровые седативные средства ....	139	Инородное тело дыхательных путей .....	205
Антихолинергические препараты .....	142	Основные положения .....	205
Анестетики для локального применения .....	143	Трахеостомия .....	208
Список литературы .....	144	Основные положения .....	208
<b>12. Инфузионная терапия и кислотно-щелочное равновесие .....</b>	<b>145</b>	Список литературы .....	211
Основные положения .....	145	<b>17. Анестезия при сердечно-сосудистых операциях .....</b>	<b>212</b>
Инфузионная терапия .....	145	Основные положения .....	212
Кристаллоиды против коллоидов .....	146	Введение .....	212
Трансфузия препаратов крови .....	148	Физиология развития .....	212
Побочные реакции на переливание крови .....	149	Врожденные пороки сердца .....	214
Кислотно-щелочное равновесие .....	153	Список литературы .....	231
Список литературы .....	158	<b>18. Анестезия при торакальных операциях .....</b>	<b>232</b>
<b>13. Дыхательные пути у детей .....</b>	<b>159</b>	Основные положения .....	232
Основные положения .....	159	Развитие дыхательной системы .....	232
Эмбриология и анатомия дыхательных путей у детей .....	159	Нормальная физиология дыхания .....	233
Обеспечение проходимости дыхательных путей у детей .....	160	Торакоскопические вмешательства .....	239
Список литературы .....	166	Хирургические заболевания грудной клетки .....	243
<b>14. Анестезия при нейрохирургических операциях .....</b>	<b>167</b>	Список литературы .....	245
Основные положения .....	167	<b>19. Анестезия при операциях на органах желудочно-кишечного тракта .....</b>	<b>246</b>
Нейроанатомия, особенности развития и нейрофизиология .....	168	Основные положения .....	246
Предоперационное обследование .....	172	Введение .....	246
Особенности конкретных заболеваний и операций .....	176	Пилоростеноз .....	247
Заключение .....	182	Паховая грыжа .....	248
Список литературы .....	182	Пупочная грыжа .....	250
		Лапароскопические операции .....	251
		Кишечная инвагинация .....	252
		Гастрошизис и омфалоцеле .....	253

Врожденная диафрагмальная грыжа .....	257	Вторичный осмотр .....	339
Аппендицит .....	260	Отдельные неотложные ситуации .....	344
Аганглионарный мегаколон (болезнь Гиршпрунга) .....	262	Обезболивание после ожогов .....	349
Список литературы .....	263	Заключение .....	349
<b>20. Особенности анестезии при эндокринных расстройствах .....</b>	<b>264</b>	<b>24. Анестезия при трансплантации почки .....</b>	<b>350</b>
Основные положения .....	264	Основные положения .....	350
Контроль гликемии .....	264	Введение .....	350
Вставка 20.1. Расчет фактора коррекции инсулина .....	266	Эпидемиология .....	351
Заболевания щитовидной железы .....	268	Патофизиология .....	351
Вставка 20.2. Причины гипертиреоза у детей .....	269	Хирургическая техника .....	352
Вставка 20.3. Основные особенности проведения анестезии при заболеваниях щитовидной железы .....	274	Предоперационное обследование .....	353
Заболевания паращитовидных желез .....	276	Интраоперационное ведение .....	353
Вставка 20.4. Заместительная терапия стероидами при стрессе .....	278	Список литературы .....	358
Гипоталамо-гипофизарно- надпочечниковая ось .....	281	<b>25. Анестезия при трансплантации печени .....</b>	<b>359</b>
Заболевания надпочечников: кора надпочечников .....	282	Основные положения .....	359
Нарушения функции сетчатой зоны коры надпочечников .....	285	Клинический случай .....	359
Список литературы .....	292	История .....	359
<b>21. Анестезия при урологических операциях .....</b>	<b>293</b>	Показания .....	360
Основные положения .....	293	Фульминантная печеночная недостаточность .....	362
Введение .....	293	Обследование перед трансплантацией ...	363
Проведение анестезии .....	298	Интраоперационное ведение .....	364
Заключение .....	301	Поддержание анестезии .....	365
Список литературы .....	301	Послеоперационное ведение .....	367
<b>22. Анестезия при ортопедических операциях .....</b>	<b>302</b>	Послеоперационные осложнения .....	368
Основные положения .....	302	Заключение .....	369
Введение .....	303	Список литературы .....	369
Проведение анестезии .....	303	<b>26. Анестезия в фетальной хирургии .....</b>	<b>370</b>
Отдельные заболевания .....	309	Основные положения .....	370
Периоперационные осложнения .....	333	Введение .....	370
Заключение .....	334	Краткая история фетальной хирургии .....	370
Список литературы .....	334	Показания к фетальным вмешательствам .....	371
<b>23. Травмы и различные неотложные состояния .....</b>	<b>335</b>	Противопоказания .....	375
Основные положения .....	335	Список литературы .....	380
Виды травм .....	335	<b>IV. Манипуляции в детской анестезиологии</b>	
Госпитализация в стационар .....	336	<b>27. Современные технологии в обеспечении проходимости дыхательных путей .....</b>	<b>383</b>
Первичный осмотр .....	336	Основные положения .....	383
		Надгортанные воздуховоды .....	383
		Классификация надгортанных воздуховодов .....	383
		Прямая ларингоскопия .....	389

Назотрахеальная интубация .....	390
Эндотрахеальные трубки .....	391
Видеоларингоскопия .....	393
Фиброоптические бронхоскопы .....	399
Экстубация при трудных дыхательных путях .....	406
Передний доступ к шее у педиатрических пациентов .....	407
Гибридные (комбинированные) методы .....	408
Видеоматериалы .....	411
Список литературы .....	411
<b>28. Внутривенный доступ</b> .....	412
Основные положения .....	412
Центральный венозный доступ .....	412
Внутренняя яремная вена .....	413
Подключичная вена .....	416
Бедренная вена .....	417
Периферический венозный доступ .....	417
Техника периферической внутривенной катетеризации .....	420
Список литературы .....	421
<b>29. Артериальный доступ</b> .....	422
Основные положения .....	422
Введение .....	422
Основы физиологии .....	422
Показания .....	423
Противопоказания .....	423
Доступные места для катетеризации артерий .....	424
Осложнения .....	425
Общий подход к катетеризации артерий .....	426
Катетеризация лучевой артерии .....	428
Интерпретация формы сигнала .....	429
Проблемы при проведении мониторинга .....	430
Список литературы .....	431
<b>30. Регионарная анестезия: блокады в области головы и шеи</b> .....	432
Основные положения .....	432
Развитие черепа .....	432
Иннервация лица .....	433
Операции на губах .....	435
Блокада звездчатого ганглия .....	441
Инфильтрация .....	441
Заключение .....	441
Список литературы .....	441
<b>31. Регионарная анестезия: блокады верхней и нижней конечностей</b> .....	442
Основные моменты .....	442
Введение .....	442
Показания .....	443
Противопоказания .....	443
Особые педиатрические соображения ....	443
Выбор анестетика и дозирование .....	443
Блокады верхней конечности .....	444
Блокады нижней конечности .....	448
Список литературы .....	455
<b>32. Регионарная анестезия: блокады нервных стволов</b> .....	456
Основные моменты .....	456
Введение .....	456
Местные анестетики .....	456
Методология блокад .....	457
Блокада поперечной мышцы живота ....	457
Блокада квадратной мышцы поясницы ....	459
Блокада влаглища прямой мышцы живота .....	460
Паравертебральная блокада .....	462
Блокада плоскости мышцы, выпрямляющей позвоночник .....	463
Другие блокады нервных стволов .....	464
Список литературы .....	464
<b>33. Регионарная анестезия: нейроаксиальные блокады</b> .....	465
Основные положения .....	465
Местные анестетики и особенности развития .....	465
Нейроаксиальные методы .....	466
Адьювантные анальгетики .....	469
Методы установки .....	470
Заключение .....	471
Список литературы .....	471
<b>V. Особые ситуации</b>	
<b>34. Интраоперационные осложнения и действия в критических ситуациях</b> ...	475
Основные положения .....	475
Введение .....	475
Принципы антикризисного управления ...	476
Симуляционное обучение .....	476
Когнитивные пособия .....	477
Юридические аспекты осложнений .....	478
Сообщение плохих новостей .....	479
Лекарственные ошибки .....	480
Кардиальные события и остановка кровообращения .....	481

Аспирация .....	481	Нейрореанимационная помощь .....	540
Ларингоспазм .....	483	Госпитальные проблемы .....	545
Травма зубов .....	483	Список литературы .....	547
Злокачественная гипертермия .....	484	<b>39. Сердечно-легочная реанимация</b> .....	548
Список литературы .....	485	Основные положения .....	548
<b>35. Детская амбулаторная анестезия: что нового в обеспечении безопасности?</b> .....	486	Распознавание остановки кровообращения .....	549
Основные положения .....	486	Механика сердечно-легочной реанимации .....	549
Список литературы .....	497	Фибрилляция желудочков/ желудочковая тахикардия .....	553
<b>36. Анестезия в педиатрии за пределами операционной</b> .....	498	Качество сердечно-легочной реанимации .....	557
Основные положения .....	498	Список литературы .....	559
Введение .....	498	<b>40. Синдромы</b> .....	560
Общие соображения .....	498	Основные положения .....	560
Список литературы .....	508	Введение .....	560
<b>37. Отделение посленаркозного пребывания</b> .....	509	Трисомия 21 (синдром Дауна) .....	561
Основные положения .....	509	Синдром Тернера .....	563
Список литературы .....	520	Ассоциация ПАСТПК .....	564
<b>38. Критические состояния в педиатрии</b> ...	521	Синдром КСАЗГУ .....	565
Основные положения .....	521	Синдром делеции 22Q11 .....	566
Введение .....	521	Синдром Беквита–Видемана .....	567
Дыхательная система .....	521	Мышечные дистрофинопатии .....	568
Острый респираторный дистресс-синдром .....	525	Синдром Нунан .....	570
Сердечно-сосудистая система .....	527	Синдром Уильямса .....	570
Питание .....	531	Список литературы .....	575
Почки .....	533	Предметный указатель .....	576

# Физиологические аспекты

Ниту Чандран и Эдгар Э. Кисс



## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Малый родничок закрывается примерно в возрасте 6 мес, а большой — от 12 до 18 мес. Поэтому медленное увеличение внутричерепного объема до сращения черепных швов компенсируется увеличением окружности головы.
2. Признаки внутричерепной гипертензии у взрослых различаются по сравнению с детьми. Типичные признаки высокого внутричерепного давления (ВЧД) включают повышенную раздражительность, головные боли, снижение аппетита и объема съеденной пищи и утреннюю рвоту.
3. Скорость метаболизма кислорода (Cerebral Metabolic Rate;  $CMRO_2$ ) у детей увеличена до 5,2 мл на 100 г в минуту, что делает их более восприимчивыми к гипоксемии, в отличие от новорожденных, у которых  $CMRO_2$  ниже 3,5 мл на 100 г в минуту, что определяет толерантность их к гипоксемии.
4. У детей к возрасту 5 лет нормальный объем спинномозговой жидкости составляет 150 мл и равен объему ликвора у взрослого человека.

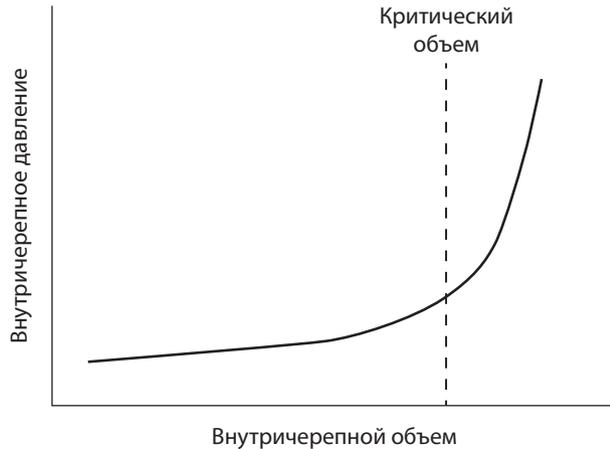
## ЦЕНТРАЛЬНАЯ И ВЕГЕТАТИВНАЯ НЕРВНАЯ СИСТЕМА

Мозг при рождении составляет 1/10 веса тела. У новорожденного количество нейронов составляет четверть количества нейронов взрослых. К концу первого года жизни клетки коры головного мозга и ствола развиты полностью. Миелинизация и си-

наптогенез остаются незавершенными до 3-летнего возраста. Примитивные рефлексy, такие как рефлекс Моро и хватательный рефлекс, исчезают по завершении миелинизации. При рождении медуллярный конус находится на уровне  $L_{III}$ , а дуральный мешок заканчивается на уровне  $S_I$ . К концу первого года жизни медуллярный конус поднимается до  $L_I$ , а дуральный мешок укорачивается до  $S_I$ . В отличие от центральной нервной системы, вегетативная нервная система является развитой уже при рождении, хотя и незрелой. Парасимпатическая система остается интактной и полностью функционирует в отличие от симпатического отдела, который развивается к 4–6 мес [1–3].

Внутричерепное пространство состоит из трех компонентов: ткани головного мозга (80%), ликвора (10%) и крови (10%). Гипотеза Монро–Келли утверждает, что сумма всех внутричерепных компонентов является величиной постоянной (рис. 1.1). В частности, увеличение объема одного из компонентов, вызывающее повышение внутричерепного давления, приводит к компенсаторному уменьшению других составляющих для коррекции произошедших изменений. Исключением из этой доктрины являются новорожденные и младенцы, поскольку черепные швы у них открыты уже при рождении. Малый родничок закрывается в возрасте около 6 мес, а большой — в возрасте от 12 до 18 мес. Поэтому медленное увеличение внутричерепного объема до сращения черепных швов компенсируется увеличением окружности головы. Однако резкое и выраженное увеличе-

ние ВЧД может приводить к вклинению мозга в затылочное отверстие. Дети с закрытыми родничками имеют более высокий риск вклинения по сравнению со взрослыми вследствие более низкого внутричерепного комплаенса и меньшего объема черепа [4].



**Рис. 1.1.** Гипотеза Монро-Келли. Увеличение объема одного из компонентов, вызывающее повышение внутричерепного давления, приведет к компенсаторному уменьшению других компонентов, чтобы компенсировать произошедшее изменение. (Адаптировано с разрешения: Butterworth IV J.F., Mackey D.C., Wasnick J.D. eds. Morgan & Mikhail's Clinical Anesthesiology. 6th ed. 2018. <https://accessmedicine.mhmedical.com>. Copyright © McGraw Hill LLC. All rights reserved)

Поддержание адекватного церебрального перфузионного давления (ЦПД) помогает предотвратить ишемию головного мозга. ЦПД зависит от среднего артериального давления (СрАД), ВЧД и центрального венозного давления (ЦВД). ЦПД определяется как разность СрАД — ВЧД (или ЦВД, если оно выше, чем ВЧД). Следовательно, увеличение ВЧД либо уменьшение СрАД может приводить к снижению ЦПД. Нормальное ВЧД у детей и взрослых составляет менее 15 мм рт.ст. ВЧД у доношенных младенцев составляет от 2 до 6 мм рт.ст. и, вероятно, еще ниже у недоношенных новорожденных [2]. ВЧД может долго оставаться нормальным даже в условиях значительной внутричерепной патологии у младенцев с открытыми родничками.

Данные о нормальных нейрофизиологических показателях у детей являются ограниченными. Большинство данных экстраполировано из массивов данных о животных либо взрослых. Мозговой кровоток

(церебральный кровоток) изменяется с возрастом (табл. 1.1). Мозговой кровоток (МК) связан с  $CMRO_2$  в мозговой ткани. Нормальный  $CMRO_2$  у взрослых составляет 3,5 мл на 100 г в минуту.  $CMRO_2$  у детей увеличивается до 5,2 мл на 100 г в минуту, что делает их более восприимчивыми к гипоксемии, в отличие от новорожденных, у которых  $CMRO_2$  составляет ниже 3,5 мл на 100 г в минуту, что делает их относительно устойчивыми к гипоксемии [5–8].

**Таблица 1.1.** Возрастные изменения ЦСЖ

Возраст	МК
Недоношенный новорожденный	~14–20 мл на 100 г в минуту
Доношенный новорожденный	~40 мл на 100 г в минуту
Ребенок	~90–100 мл на 100 г в минуту, что составляет 25% от сердечного выброса

Церебральная ауторегуляция способна поддерживать МК на постоянном уровне, несмотря на изменения ЦПД, путем сокращения и расслабления артериол в ответ на давление и растяжение [5]. У взрослых МК остается постоянным в диапазоне от 50 до 150 мм рт.ст. За пределами этих параметров ауторегуляция МК будет зависеть от давления, что может приводить к ишемии или, наоборот, гиперемии мозга. Показатели ауторегуляции у детей не очень хорошо известны, хотя было показано, что новорожденные и маленькие дети особенно уязвимы к ишемии головного мозга и внутрижелудочковым кровоизлияниям. Следует уделять особое внимание надлежащему контролю за уровнем артериального давления [9].

Спинномозговая жидкость в головном мозге вырабатывается сосудистым сплетением и поглощается паутинными ворсинками. Взрослые и дети вырабатывают около 500 мл СМЖ в сутки, что составляет 0,3–0,4 мл/мин. У детей к 5 годам нормальный объем ликвора составляет 150 мл и равен таковому у взрослых. Ацетазоламид, фуросемид и глюкокортикоиды способны временно снижать выработку СМЖ. Увеличение ВЧД приводит к увеличению скорости реабсорбции ликвора, за исключением случаев внутричерепного кровоизлияния, воспаления или обструкции току ликвора [1, 2, 4, 10].

### ► Сердечно-сосудистая система

1. Как правый, так и левый желудочки плода обеспечивают системный кровоток, а различные сосудистые коммуникации позволяют перемешиваться насыщенной кислородом крови с дезоксигенированной кровью.
2. Существуют три важные сосудистые коммуникации плода — артериальный проток, венозный проток и овальное окно.
3. Фетальный гемоглобин обладает более высоким сродством к кислороду, чем взрослый гемоглобин, обеспечивая лучшую доставку кислорода тканям плода.
4. Четыре физиологические особенности способствуют адекватной доставке кислорода к тканям плода, несмотря на более высокое сродство к кислороду.
5. Переход физиологии плода к физиологии новорожденного начинается с первого вдоха и включает закрытие овального окна, артериального протока и венозного протока.
6. Организация системы кровообращения претерпевает ряд изменений.
7. Изменения сердечной гемодинамики включают снижение постнагрузки и объемной нагрузки на правый желудочек и увеличение постнагрузки и объемной нагрузки на левый желудочек.
8. Открытое овальное отверстие встречается у четверти взрослого населения.
9. Миокард новорожденных и младенцев незрелый и чувствительный к депрессивному влиянию различных агентов и анестетиков.
10. У новорожденных и младенцев преобладает парасимпатическая вегетативная система до тех пор, пока симпатическая нервная система не достигнет зрелости.

## ВНУТРИУТРОБНАЯ АНАТОМИЯ И ФИЗИОЛОГИЯ

### ► Кровообращение и анатомия плода

Внутриутробно плацента отвечает за респираторный газообмен между матерью и плодом. Дезоксигенированная кровь проходит через две пупочные артерии к плаценте для осуществления пренатального дыхания. Кровь возвращается к плоду через единственную пупочную вену, которая несет оксигенированную кровь, насыщенную кислородом

примерно на 80%, с парциальным давлением кислорода ( $pO_2$ ) около 30 мм рт.ст. Для сравнения:  $pO_2$  в артериях пуповины составляет приблизительно 16 мм рт.ст. 50% кровотока плода минует, обходя печень через венозный проток. Остальная часть крови поступает в левую долю печени. Кровоток правой доли осуществляется через портальное кровообращение. Кровь из правой и левой печеночных вен смешивается с кровью из венозного протока и поступает в правое предсердие через нижнюю полую вену [11–14].

Большая часть крови, поступающей в правое предсердие, шунтируется в левое предсердие через открытое овальное окно в обход правого желудочка через евстахиев клапан, расположенный на стыке нижней полой вены и правого предсердия. Кровь поступает в левый желудочек и далее через аорту доставляется в верхнюю часть тела для перфузии мозга и сердца. Насыщение крови кислородом, выбрасываемой из левого желудочка, составляет примерно 70% за счет прямого пассажа через венозный проток. Верхняя полая вена несет дезоксигенированную кровь из верхней части тела в правое предсердие и желудочек. Высокое легочное сосудистое сопротивление (ЛСС) способствует тому, что почти весь выброс правого желудочка шунтируется через артериальный проток (соединение между легочной артерией и аортой), минуя легкие и попадая в системную циркуляцию. Исследования показывают, что в утробе матери на 30-й неделе гестационного периода общий легочный кровоток составляет около 25% от совокупного выброса желудочков, но может составлять всего 13% на 20-й неделе, прежде чем снизится до 21% на 38-й неделе гестационного периода [15]. Нижняя часть тела, включая почки и кишечник, снабжается кровью с насыщением кислородом всего 55% [11–14].

### ► Доставка кислорода внутриутробно

Четырьмя физиологическими особенностями, которые способствуют адекватной доставке кислорода к тканям плода, несмотря на низкое насыщение кислородом, являются (1) наличие фетального гемоглобина (HbF), (2) низкие уровни 2,3-дифосфоглицерата, а также (3) низкое сродство HbF к 2,3-дифосфоглицерату и (4) интенсивный эритропоэз, приводящий к более высокому уровню гематокрита и гемоглобина

около 170 г/л. Парциальное давление кислорода ( $pO_2$ ), равное 50, при котором происходит 50% насыщение гемоглобина, составляет менее 19 мм рт.ст., в отличие от гемоглобина взрослого человека (HbA), для которого  $pO_2 = 50$ , составляет 26 мм рт.ст. Таким образом, фетальный гемоглобин обладает более высоким сродством к кислороду, имея лучшее поглощение кислорода из крови матери в плаценте. В свою очередь, повышенное сродство с кислородом компенсируется более низким рН плода, обеспечивающим адекватную доставку кислорода к тканям [11, 16].

### ► Трансформация кровообращения в перинатальном периоде

Для обеспечения выживания физиология плода претерпевает кардинальные изменения в первые несколько минут после рождения. Когда-то параллельная циркуляция теперь меняется на последовательную, поскольку ЛСС значительно снижается вследствие повышения напряжения уровня кислорода. Аэрация легких стимулирует эндотелий к выделению оксида азота и  $PGI_2$ , которые являются мощными сосудорасширяющими средствами. С увеличением кровотока через легкие и пережатием сосудов пуповины, вызывающими повышенное системное сосудистое сопротивление (ССС), давление в левых отделах сердца увеличивается. Функционирующее овальное окно закрывается в момент, когда давление в левом предсердии начинает превышать давление в правом предсердии, оказывая гидростатическое давление на *septum primum*, но остается анатомически открытым у большинства младенцев. До четверти взрослых и половины детей младше 5 лет могут иметь анатомически открытое овальное окно [17]. Артериальный проток начинает закрываться в первые часы жизни почти у всех доношенных детей к четвертым суткам вследствие деградации плацентарных простагландинов и повышения напряжения кислорода [18]. Фиброз артериального протока происходит в течение 3 нед после рождения, завершаясь его трансформацией в артериальную связку [19, 20].

Сердечный выброс левого желудочка увеличивается после рождения вследствие увеличения легочного венозного возврата и транзитного шунтирования крови слева направо на уровне протока. Происходит увеличение преднагрузки желудочков, ударного объема и частоты сердечных сокращений

для того, чтобы организм новорожденного мог приспособиться к увеличению скорости метаболизма, которая в два раза выше, чем у взрослого человека. Происходит уменьшение объема и давления правого желудочка вследствие устранения возврата крови по пупочной вене и снижения легочного сосудистого сопротивления. Кровоток через венозный проток прекращается после пережатия пуповины и инвагинируется обычно ко 2-й неделе жизни. Гипоксия, ацидоз, гиперкарбия и гипотермия могут устойчиво вернуть кровообращение новорожденного к кровообращению плода [11, 12, 15, 20].

### ► Сердечно-сосудистая система в послеродовом периоде

У незрелого сердца новорожденного имеется несколько ограничений по сравнению с сердцем детей старшего возраста и взрослых. Снижение преднагрузки и частоты сердечных сокращений плохо переносятся новорожденными. Уменьшенное количество саркомеров и плохо развитая система транспорта кальция ограничивают сократительные резервы сердца, увеличивая его зависимость от внеклеточного кальция во время сокращения. Однако незрелый миокард более устойчив к ишемии с быстрым восстановлением своих функций в отличие от миокарда взрослого человека, возможно, вследствие преимущественного использования углеводов и лактата в качестве основных источников энергии. Ударный объем сердца относительно фиксирован, а сердечный выброс связан с частотой сердечных сокращений вследствие низкой растяжимости левого желудочка, однако более поздние эхокардиографические исследования у новорожденных и плода все-таки продемонстрировали способность сердца увеличивать ударный объем [21–26].

Развитие симпатической системы отстает от парасимпатической системы, и ее стимуляция посредством гипоксии, хирургической травмы или даже прямой ларингоскопии у новорожденных может приводить к развитию брадикардии и гипотензии. Сосудистая система младенцев также менее чувствительна к гиповолемии по сравнению с детьми старшего возраста и взрослыми. Снижение объема циркулирующей крови у новорожденных и младенцев может проявляться в виде гипотензии без тахикардии. Однако эти физиологические ограничения

обычно разрешаются после периода младенчества, начиная с 6-месячного возраста у доношенных новорожденных [12, 13, 27–40].

### ► Дыхательная система

1. Терминальные бронхиолы развиваются к 16-й неделе беременности, в то время как формирование альвеол начинается на 36-й неделе беременности.
2. Развитие альвеол завершается к 18 мес, в то время как легкие в целом продолжают развиваться на протяжении всего периода детства.
3. По сравнению с детьми старшего возраста, легкие и грудная клетка новорожденных имеют высокую податливость (малые силы упругости), что может способствовать образованию ателектазов при дыхании.
4. Механизмы, которые поддерживают функциональную остаточную емкость (ФОЕ), у новорожденных и младенцев прекращают действовать под влиянием анестезии.
5. Апноэ часто встречается у недоношенных новорожденных и анемичных пациентов до 60 нед постменструального периода.
6. Перстневидный хрящ является самым узким местом дыхательных путей ребенка.
7. Небольшие изменения диаметра дыхательных путей могут приводить к выраженной обструкции дыхательных путей у детей.
8. Легочное сосудистое сопротивление достигает взрослых значений к 6 мес.

### ► Легкие плода

Легкие плода начинают формироваться в течение первых недель жизни, когда его длина составляет всего 3 мм. Бронхиальное дерево развивается вплоть до терминальных бронхиол к 16-й неделе беременности, а остальные дистальные структуры развиваются на протяжении всего остального периода беременности. Примерно на 24–25-й неделе беременности во время периода формирования альвеолярных ходов начинают образовываться легочные капилляры, которые контактируют с незрелым альвеолярным эпителием. Начиная с 30-й гестационной недели кубовидный альвеолярный эпителий уплощается и начинает вырабатывать легочный сурфактант, который обеспечивает альвеолярную стабильность для поддержания легких в расправ-

ленном состоянии после рождения. На 34-й неделе беременности уже имеется достаточное количество сурфактанта, а введение глюкокортикоидов в организм матери может ускорить его выработку у плода. У доношенного новорожденного присутствует только одна десятая часть альвеол взрослого человека, число которых продолжает увеличиваться и значительно развиваться с момента рождения примерно до 18 мес. Во время внутриутробного развития легкие плохо перфузируются и остаются заполненными жидкостью, которая периодически выделяется из них, приводя к образованию 1/3 объема околоплодных вод [12, 13].

### ► Дыхательная система в послеродовом периоде

Основная цель функционирования дыхательной системы — это поддержание баланса кислорода и углекислого газа в организме. При пережатии пуповины при рождении легкие берут на себя функцию плаценты как органа газообмена. Другие составляющие дыхательной системы включают дыхательные центры ствола головного мозга; центральные и периферические хеморецепторы; диафрагмальные, межреберные, подъязычные и блуждающие нервы; грудную клетку, верхние и нижние дыхательные пути, альвеолы и паренхиму легких, а также легочную сосудистую систему [12, 13].

Более высокие показатели метаболизма новорожденных и младенцев, высокие требования к вентиляции и меньшая площадь поверхности газообмена новорожденного также способствуют быстрой десатурации. По сравнению с детьми старшего возраста у новорожденных легкие и грудная стенка имеют высокую податливость (малые силы упругости), что может способствовать развитию ателектазов при дыхании. Эластические волокна легких изначально развиты слабо, но способны развиваться в послеродовом периоде. У новорожденных наблюдается слабая экскурсия грудной стенки в переднезаднем направлении вследствие горизонтальной ориентации реберных хрящей и плохо развитых мышц грудной стенки. Однако ФОЕ, объем, оставшийся в легких после пассивного выдоха, поддерживается другими механизмами по сравнению со взрослыми. У детей старшего возраста и взрослых объем легких поддерживается за счет пассивного эластического напря-

жения грудной клетки, уравниваемого эластическим напряжением легких. Вдох происходит в основном вследствие уплощения диафрагмы, которая в большей степени подвержена развитию слабости из-за высокой доли мышечных волокон I типа. Младенцы, находящиеся в сознании, способны поддерживать более высокие объемы легких в конце выдоха, у них высокая ФОЕ поддерживается посредством более высокой жесткости грудной стенки за счет тонического сокращения межреберных мышц и диафрагмы на протяжении всего дыхательного цикла. Кроме того, у них фаза выдоха прекращается до того, как объем воздуха в легких достигнет ФОЕ вследствие (1) напряжения диафрагмы и (2) смыкания голосовых связок, что позволяет эффективно создавать РЕЕР. Однако все эти механизмы утрачиваются во время анестезии, что приводит к развитию ателектазов и десатурации. У маленьких детей, подвергающихся общей анестезии с миорелаксацией, ФОЕ составляет всего лишь 15% от общей емкости легких. Кроме того, у доношенных новорожденных имеется только 1/10 от числа терминальных альвеол взрослого ребенка [12, 13, 41–44].

Новорожденные и младенцы имеют замедленную реакцию на изменение концентрации углекислого газа и кислорода в крови. Нагнетание воздуха в легкие может приводить к апноэ (рефлекс Геринга–Брейера). С физиологической точки зрения этот вагус-опосредованный рефлекс дыхательных путей предназначен для обеспечения возможности выдоха при гиперинфляции легких, но парадоксально может приводить и к апноэ. Апноэ часто встречается у недоношенных новорожденных и анемичных пациентов в периоде до 60 нед гестационного возраста [45, 46]. Кроме того, дыхание не зависит от парциального напряжения углекислого газа в легочной артерии, а гипоксия парадоксальным образом способна угнетать дыхание [47, 48].

По сравнению с детьми старшего возраста, у младенцев пропорционально большие размеры головы и языка, гортань расположена кпереди и более цефалически, более узкие носовые ходы и более длинный надгортанник, имеющий ω-подобную форму. Анатомические особенности новорожденных и младенцев в возрасте до 5 мес приводят к тому, что дыхание через нос является облигатным признаком. Кроме того, небольшие изменения диаметра дыхательных путей у младенцев вследствие отека или наличия

выделений могут приводить к выраженной обструкции дыхательных путей [12, 13]. Было продемонстрировано, что перстневидный хрящ является самым узким местом дыхательных путей у детей в возрасте младше 10–12 лет в отличие от голосовой щели у взрослых [49–56].

### ► Регуляция легочного кровотока

Легочное сосудистое сопротивление начинает снижаться после рождения, достигая взрослого уровня к 6 мес [56]. Однако легочные сосуды новорожденных и младенцев остаются чувствительными и в определенных условиях тонус легочных сосудов может увеличиваться. У новорожденных эти изменения могут приводить к сохранности кровообращения плода, шунтированию и гипоксии даже при подаче 100% кислорода. Болезнь легких, гипоксемия, гиперкапния, сепсис, ацидоз, гипотермия и кашель при наличии эндотрахеальной трубки — все это может увеличить сопротивление легочных сосудов [57]. Оксид азота<sup>®</sup>, простагландины, гистамин и β-адренергические катехоламины оказывают сосудорасширяющее действие на сосуды легких. Увеличение давления в правых отделах сердца может приводить к диастолической дисфункции правого желудочка и гипоксии при развитии шунтирования крови справа налево через открытое овальное окно [58].

### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Формирование нефронов завершается к 36-й неделе беременности; однако почечная система является еще не полностью зрелой к моменту рождения.
2. У рожденных в срок скорость клубочковой фильтрации (СКФ) составляет всего 25% от уровня взрослого и достигает его уровня примерно к 2 годам.
3. Все транспортеры, расположенные на уровне канальцев и зависящие от градиента натрия, уменьшены в количественном отношении и являются незрелыми при рождении. Сочетание этих факторов снижает способность новорожденных концентрировать или разбавлять мочу по сравнению со взрослыми.
4. Креатинин сыворотки отражает уровень креатинина у матери при рождении, а затем начинает снижаться. По мере роста ребенка клиренс креатинина медленно увеличивается и достигает уровня взрослого примерно к 2 годам вследствие быстрого увеличения мышечной массы и роста тела.

### ► Почечная система

Нефроны завершают формирование к 36-й неделе беременности, однако почечная система является не полностью зрелой при рождении. Выделение мочи начинается на 10-й неделе беременности, что помогает поддерживать баланс околоплодных вод [59, 60]. Плаценте принадлежит роль поддержания баланса электролитов и жидкости у плода. Почки берут на себя очистительную функцию после рождения. СКФ и почечный кровоток у новорожденного снижены. И тот и другой показатели увеличиваются с гестационным возрастом по мере снижения почечного сосудистого сопротивления [61]. У рожденных в срок СКФ составляет всего 25% от уровня взрослых [62]. СКФ достигает уровня взрослого примерно к 2 годам [63, 64]. Аналогично этому функция канальцев продолжает улучшаться в течение первых 2 лет жизни. Все канальцевые транспортные системы, зависящие от градиента натрия, уменьшены в количественном отношении и являются незрелыми при рождении. Сочетание этих факторов снижает способность новорожденного концентрировать или разбавлять мочу по сравнению со взрослыми [65]. Способность к разведению начинает созревать примерно на 4-й неделе жизни [66]. Креатинин сыворотки отражает уровень креатинина у матери при рождении, а затем начинает снижаться. По мере ро-

ста ребенка клиренс креатинина медленно увеличивается и достигает уровня взрослого примерно к 2 годам вследствие быстрого увеличения мышечной массы и роста [67].

По сравнению со взрослыми у младенцев отмечаются более низкие уровни бикарбоната и  $\text{PaCO}_2$  в сыворотке крови. У них наблюдается более интенсивное образование эндогенной углекислоты за счет повышенного отложения кальция в костной ткани [68]. Нормальная абсорбция бикарбоната через желудочно-кишечный тракт помогает нейтрализовать эту кислоту. Когда этот процесс нарушается, например вследствие гастроэнтерита, голода или болезни, у младенцев может развиваться сильный ацидоз, поскольку они не в состоянии компенсировать избыточную кислотную нагрузку [68]. Ренин-ангиотензиновая система уже присутствует на ранних сроках беременности. Активность ренина в сыворотке крови повышена при рождении и остается таковой и далее. Активность ренина снижается до взрослого уровня к 6–9 годам [69].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

