

## «Спортивное» сердце: ЧСС максимальная и ЭКГ

Тюрюмин Я.Л.

**Аннотация.** В статье рассматривается модель «идеальной» или «должной» ЭКГ в зависимости от зоны тренировочной нагрузки для «спортивного» сердца. Цель исследования. Разработать модель «идеальной» или «должной» ЭКГ для описания электрической систолы и диастолы предсердий и желудочков от ЧСС<sub>мин</sub> = 40 уд/мин до ЧСС<sub>макс</sub> = 200 уд/мин. Результаты исследования. Обсуждаются продолжительности интервалов P-Q, Q-T, T-P и R-R, сегментов P-Q и S-T, комплекса QRS, пиков P и T, представленные в модели «идеальной» или «должной» ЭКГ, в зависимости от ЧСС, зоны упражнений аэробной и анаэробной мощности, фракции выброса левого желудочка, механизма ресинтеза АТФ, потребления кислорода и дыхательного коэффициента. Выводы. Представленная модель «идеальной» или «должной» ЭКГ от ЧСС покоя (ЧСС = 70 уд/мин) до ЧСС максимальной (ЧСС = 200 уд/мин) соответствует всем физиологическим нормам ЭКГ для каждой зоны упражнений аэробной и анаэробной мощности. Минимальные значения сегмента S-T (0-1 мс) и интервала T-P (0-1 мс) определяют максимальную частоту сердечных сокращений.

**Ключевые слова:** «спортивное» сердце, ЭКГ, ЧСС максимальная.

The athlete's heart: maximum heart rate and ECG.

**Abstract.** The article discusses the model of an "ideal" or "proper" ECG, depending on the zones of training exercises for an "athlete's" heart. Aim. To develop a model of an "ideal" or "proper" ECG for description of the electrical systole and diastole of the atria and ventricles from HR<sub>min</sub> = 40 bpm to HR<sub>max</sub> = 200 bpm. Results. The duration of P-Q, Q-T, T-P and R-R intervals, P-Q and S-T segments, QRS complex, P and T peaks, presented in the model of "perfect" or "corrected" ECG are discussed depending on heart rate, zones of training exercises of aerobic and anaerobic power, left ventricular ejection fraction, mechanism of ATP resynthesis, oxygen consumption and respiratory exchange ratio. Conclusion. The presented model of the "ideal" or "proper" ECG from resting heart rate (HR = 70 bpm) to maximum heart rate (HR = 200 bpm) corresponds to all physiological ECG limits for each zone of training exercises of aerobic and anaerobic power. The minimal values of the S-T segment (0-1 ms) and the T-P interval (0-1 ms) determine the maximal heart rate.

**Key words:** "athlete's" heart, ECG, maximal heart rate.

**Актуальность.** Сердечно-сосудистая система является важной составляющей в кислородтранспортной системе. Функциональное состояние сердца определяет количество крови, поступающее в большой и малый круг кровообращения. При увеличении физической нагрузки сердце перестраивает свою работу [1, 2, 6].

Механизмов адаптации сердца к физической нагрузке два:

1. увеличение фракции выброса из левого желудочка;
2. увеличение частоты сердечных сокращений.

При постоянных аэробных или анаэробных физических нагрузках различной мощности формируется «спортивное» сердце.

Формирование «спортивного» сердца идет по двум основным механизмам [2, 6]:

1. увеличение конечно-диастолического объема левого желудочка;
2. увеличение толщины миокарда левого желудочка.

Идеальное «спортивное» сердце – это когда два механизма адаптации к различным типам физической нагрузки протекают параллельно. Конечно-диастолический объем левого желудочка может увеличиваться со 100 мл до 200 мл ( $d$  – гипертрофия), толщина миокарда левого желудочка может повышаться с 7-8 мм до 12-15 мм [2, 6]. Сформированное «спортивное» сердце значительно повышает возможности спортсмена для выполнения в большей степени аэробно-анаэробных тренировочных нагрузок большой и субмаксимальной мощности [2, 6].

**Цель исследования.** Разработать модель «идеальной» или «должной» ЭКГ для описания электрической систолы и диастолы предсердий и желудочков от ЧСС<sub>мин</sub> = 40 уд/мин до ЧСС<sub>макс</sub> = 200 уд/мин.

**Методы исследования.** Для построения модели «идеальной» или «должной» ЭКГ использовали модифицированную формулу Н. Bazett [8]. Продолжительности интервалов P-Q, Q-T, T-P и R-R, сегментов P-Q и S-T, комплекса QRS, пиков P и T, представленные в модели «идеальной» или «должной» ЭКГ находились в физиологических соотношениях и не конфликтовали между собой (скорость проведения электрического импульса из синоатриального (С-А) и атриовентрикулярного (А-В) узла, по А-В пучку и волокнам Пуркинью, скорость и продолжительность сокращения предсердий и желудочков (систола), продолжительность расслабления предсердий и желудочков (диастола)) [1, 3, 4, 7]. Максимальную ЧСС (ЧСС<sub>макс</sub>) рассчитывали по Fox S.M. et al. (1971).

**Результаты исследования.** При ЧСС = 70 ударов в минуту в покое основную физическую работу выполняют мышечные волокна I типа (100%), дыхательный коэффициент равен 0.70.

В сердечной мышце для ресинтеза АТФ используются свободные жирные кислоты (100%). При ЧСС = 70 ударов в минуту интервал R-R = 857 мс, интервал P-Q = 159 мс, пик P = 105 мс, сегмент P-Q = 54 мс, интервал Q-T = 338 мс, сегмент S-T = 99 мс, интервал QRS+T без сегмента S-T = 239 мс, интервал T-P = 360 мс. Диастола желудочков TQ = TP + PQ = 519 мс.

Интервал P-Q соответствует продолжительности электрической систолы предсердий и атриовентрикулярной проводимости, интервал Q-T соответствует продолжительности электрической систолы желудочков и электрической диастоле предсердий, интервал T-P соответствует продолжительности электрической диастолы предсердий и желудочков [3, 4, 7].

Во время электрической диастолы предсердий и/или желудочков происходит наполнение коронарных артерий артериальной кровью, обмен O<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O между гемоглобином эритроцитов артериальной крови и кардиомиоцитами, поступление O<sub>2</sub>, свободных жирных кислот, глюкозы и молочной кислоты из артериальной крови в митохондрии кардиомиоцитов для ресинтеза АТФ. Соответственно, продолжительность электрической диастолы предсердий и/или желудочков играет важную роль в процессах

поступления энергетических продуктов для аэробного ресинтеза АТФ в митохондриях кардиомиоцитов и выведения продуктов аэробного метаболизма  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  [1].

Соответственно, электрическая диастола предсердий включает интервал Q-T плюс интервал T-P, электрическая диастола желудочков включает интервал P-Q плюс интервал T-P. Соотношение систола/диастола желудочков включает соотношение интервала Q-T к сумме интервалов T-P и P-Q [3, 4, 7].

При повышении ЧСС = 70-100 ударов в минуту к выполнению физической работы мышечными волокнами I типа (80%) присоединяются окислительные мышечные волокна IIa типа (20%), дыхательный коэффициент равен 0.76.

В сердечной мышце для ресинтеза АТФ используются свободные жирные кислоты (80%) и глюкоза (20%). При ЧСС = 100 ударов в минуту интервал R-R = 600 мс, интервал P-Q = 134 мс, пик P = 88 мс, сегмент P-Q = 46 мс, интервал Q-T = 285 мс, сегмент S-T = 77 мс, интервал QRS+T без сегмента S-T = 208 мс, интервал T-P = 181 мс. Диастола желудочков TQ = TP + PQ = 315 мс. При ЧСС = 75 ударов в минуту соотношение систола/диастола желудочков = 2/3.

Зона ЧСС = 70-100 ударов в минуту 30-50% от ЧСС макс оптимальна для занятий массовой или лечебной физической культурой (зона упражнений малой аэробной мощности), фракция выброса соответствует 60-70% [5].

При увеличении мощности физической нагрузки происходит увеличение объема крови, поступающей по нижней и верхней полой вене к правому предсердию (венозный возврат). Растяжение правого предсердия вызывает генерацию импульсов от правого предсердия в сосудодвигательный центр продолговатого мозга, а затем обратные импульсы по симпатическим и блуждающим нервам поступают к сердцу и вызывают увеличение ЧСС (рефлекс Бейнбриджа) [1].

Увеличение венозного возврата приводит к растяжению камер сердца, что, в свою очередь, вызывает увеличение силы сердечных сокращений, т.е. чем больше степень растяжения миокарда объемом притекающей крови, тем больше сила сокращения сердечной мышцы (ударный объем) и, следовательно, тем больше объем крови (фракция выброса), который сердце перекачивает в аорту (механизм Франка-Старлинга) [1].

При повышении ЧСС = 100-120 ударов в минуту доля вовлечения окислительных мышечных волокон IIa типа повышается до 30%, работа мышечными волокнами I типа снижается до 70%, дыхательный коэффициент равен 0.79.

В сердечной мышце для ресинтеза АТФ используются свободные жирные кислоты (70%) и глюкоза (30%). При ЧСС = 120 ударов в минуту интервал R-R = 500 мс, интервал P-Q = 123 мс, пик P = 81 мс, сегмент P-Q =

42 мс, интервал Q-T = 261 мс, сегмент S-T = 61 мс, интервал QRS+T без сегмента S-T = 200 мс, интервал T-P = 116 мс. Диастола желудочков TQ = TP + PQ = 239 мс. При ЧСС = 110 ударов в минуту соотношение систола/диастола желудочков = 1/1.

Зона ЧСС = 100-120 ударов в минуту 50-60% от ЧСС макс оптимальна для сжигания жиров (зона упражнений средней аэробной мощности), фракция выброса соответствует 70-80% [5]. Прирост минутного объема крови (МОК) сопровождается параллельным увеличением ЧСС (рефлекс Бейнбриджа), ударного объема и фракции выброса с 70% до 80% (внутрисердечный механизм Франка-Старлинга) [1].

При повышении ЧСС = 120-140 ударов в минуту доля вовлечения окислительных мышечных волокон Па типа повышается до 45%, работа мышечными волокнами I типа снижается до 55%, дыхательный коэффициент равен 0.83.

В сердечной мышце для ресинтеза АТФ используются свободные жирные кислоты (55%) и глюкоза (45%). При ЧСС = 140 ударов в минуту интервал R-R = 429 мс, интервал P-Q = 114 мс, пик P = 75 мс, сегмент P-Q = 39 мс, интервал Q-T = 242 мс, сегмент S-T = 46 мс, интервал QRS+T без сегмента S-T = 196 мс, интервал T-P = 72 мс. Диастола желудочков TQ = TP + PQ = 186 мс.

Зона ЧСС = 120-130-140 ударов в минуту 60-70% от ЧСС макс оптимальна для повышения эффективности работы сердечно-сосудистой системы (зона упражнений субмаксимальной аэробной мощности) [5].

При ЧСС от 70 до 140 уд/мин имеется прямая зависимость между дозированием физической нагрузки, ЧСС и уровнем потреблением кислорода (тест PWC-170). Прирост минутного объема крови (МОК) сопровождается параллельным увеличением ЧСС (рефлекс Бейнбриджа), ударного объема и фракции выброса с 60% до 90% (внутрисердечный механизм Франка-Старлинга) [1].

При повышении ЧСС = 140-155 ударов в минуту выполнение физической работы между мышечными волокнами I типа (50%) и окислительными мышечными волокнами Па типа (50%) выравнивается, дыхательный коэффициент равен 0.85.

В сердечной мышце для ресинтеза АТФ используются свободные жирные кислоты (50%) и глюкоза (50%). При ЧСС=155 ударов в минуту спортсмен переходит порог аэробного обмена. Интервал R-R = 387 мс, интервал P-Q = 109 мс, пик P = 72 мс, сегмент P-Q = 37 мс, интервал Q-T = 231 мс, сегмент S-T = 35 мс, интервал QRS+T без сегмента S-T = 196 мс, интервал T-P = 48 мс. Диастола желудочков TQ = TP + PQ = 156 мс.

Зона ЧСС = 140-155 ударов в минуту 77-85% от ЧСС макс оптимальна для повышения эффективности аэробной выносливости (зона упражнений околомаксимальной аэробной мощности) [5]. Учитывая, что ударный объем и фракция выброса (90%) достигли своих максимальных значений, то

прирост минутного объема крови (МОК) сопровождается только увеличением ЧСС (рефлекс Бейнбриджа) [1].

При повышении ЧСС = 155-170 ударов в минуту выполнение физической работы мышечными волокнами I типа снижается до минимума (от 45% до 0) и окислительными мышечными волокнами IIa типа повышается до максимума (от 55% до 100%), дыхательный коэффициент равен 1.0.

В этот период увеличивается доля вовлечения гликолитических мышечных волокон IIa типа на фоне истощения возможностей утилизации молочной кислоты окислительными мышечными волокнами IIa типа. Как следствие, повышается концентрация молочной кислоты в гликолитических мышечных волокнах IIa типа. Концентрация молочной кислоты в крови составляет 1.0-4.0 ммоль/л.

При ЧСС = 155 ударов в минуту спортсмен переходит порог аэробного обмена, при ЧСС = 170 ударов в минуту спортсмен переходит порог анаэробного обмена, поэтому зона ЧСС = 155-170 ударов в минуту – смешанная аэробно-анаэробная, т.е. спортсмен находится в диапазоне между ПАНО-1 и ПАНО-2 [5].

В сердечной мышце для ресинтеза АТФ используются свободные жирные кислоты (0-30%), глюкоза (60-90%) и молочная кислота (10%). При ЧСС=170 ударов в минуту интервал R-R = 353 мс, интервал P-Q = 104 мс, пик P = 69 мс, сегмент P-Q = 35 мс, интервал Q-T = 221 мс, сегмент S-T = 23 мс, интервал QRS+T без сегмента S-T = 197 мс, интервал T-P = 28 мс. Диастола желудочков TQ = TP + PQ = 132 мс. При ЧСС = 160 ударов в минуту соотношение систола/диастола желудочков = 3/2.

При ЧСС от 140 до 170 уд/мин имеется прямая зависимость между дозированием физической нагрузки, ЧСС и уровнем потреблением кислорода (тест PWC-170) [5]. Прирост минутного объема крови (МОК) сопровождается увеличением ЧСС, ударный объем и фракция выброса соответствует максимальным значениям.

Зона ЧСС = 155-170 ударов в минуту 77-85% от ЧСС макс оптимальна для повышения эффективности аэробной выносливости (зона упражнений максимальной аэробной мощности) [5].

При повышении ЧСС = 170-190 ударов в минуту избыток молочной кислоты, образовавшийся в гликолитических мышечных волокнах IIa типа, не захватывается окислительными мышечными волокнами IIa типа и начинает выходить в кровь, повышается концентрация не метаболического CO<sub>2</sub>, дыхательный коэффициент повышается 1.17-1.34. Концентрация молочной кислоты в крови повышается до 15-25 ммоль/л, pH крови снижается с pH = 7,4 до pH=7,0 [5].

В сердечной мышце для ресинтеза АТФ используются глюкоза (60-70%) и молочная кислота (30-40%). При ЧСС = 190 ударов в минуту интервал R-R = 316 мс, интервал P-Q = 99 мс, пик P = 66 мс, сегмент P-Q =

33 мс, интервал Q-T = 209 мс, сегмент S-T = 8 мс, интервал QRS+T без сегмента S-T = 201 мс, интервал T-P = 8 мс. Диастола желудочков  $TQ = TP + PQ = 106$  мс. При ЧСС = 190 ударов в минуту соотношение систола/диастола желудочков = 2/1.

Зона ЧСС = 170-190 ударов в минуту 85-95% от ЧСС макс оптимальна для повышения эффективности анаэробной выносливости (зона упражнений околомаксимальной и субмаксимальной анаэробной мощности) [5].

При ЧСС 190-200 уд/мин сердечная мышца может использовать креатинфосфат для ресинтеза АТФ на короткий период до 20-25 секунд.

При ЧСС = 200 ударов в минуту интервал R-R = 300 мс, интервал P-Q = 96 мс, пик P = 63 мс, сегмент P-Q = 33 мс, интервал Q-T = 204 мс, сегмент S-T = 1 мс, интервал QRS+T без сегмента S-T = 204 мс, интервал T-P = 0 мс. Диастола желудочков  $TQ = TP + PQ = 96$  мс, т.е. только интервал P-Q = 96 мс (систола предсердий). Интервал TP = 0 (ЧСС hwr – heart without rest), т.е. продолжительность общей электрической диастолы предсердий и желудочков равна нулю.

Зона ЧСС = 190-200 ударов в минуту 95-100% от ЧСС макс оптимальна для повышения эффективности анаэробной выносливости (зона упражнений максимальной анаэробной мощности) [5].

При ЧСС более 170-200 уд/мин прирост минутного объема крови сопровождается увеличением ЧСС и уменьшением фракции выброса с 90% до 70% за счет уменьшения сегмент S-T и интервал T-P [3, 4, 7].

На графике зависимости между дозированием физической нагрузки, ЧСС и уровнем потреблением кислорода в точке ЧСС = 170 ударов в мин появляется «прогиб» пульса, отмечается превышение прироста потребления кислорода над приростом ЧСС за счет уменьшения фракции выброса с 90% до 70% [5].

Для проверки модели «идеальной» или «должной» ЭКГ были взяты показатели максимального потребления кислорода (МПК = 96 мл  $O_2$ /мин/кг) норвежского лыжника Бьорна Дели, восьмикратного олимпийского чемпиона и девятикратного чемпиона мира, шестикратного обладателя Кубка мира, победителя 46 личных гонок на этапах Кубка мира.

Конечно-диастолический объем левого желудочка в покое = 200 мл (d – гипертрофия). Конечно-диастолический объем левого желудочка во время выполнения упражнений максимальной анаэробной мощности = 240 мл (l – гипертрофия). ЧСС<sub>макс</sub> = 200 уд/мин. Фракция выброса = 70%. Ударный объем = 168 мл. МОК = 33,6 л/мин. МПК = 6,72 л  $O_2$ /мин или МПК = 96 мл  $O_2$ /мин/кг. Полученные результаты соответствуют опубликованным данным.

**Выводы.** Таким образом, представленная модель «идеальной» или «должной» ЭКГ от ЧСС покоя (ЧСС = 70 уд/мин) до ЧСС максимальной

(ЧСС = 200 уд/мин) соответствует всем физиологическим нормам ЭКГ для каждой зоны упражнений аэробной и анаэробной мощности.

По мере увеличения ЧСС (от ЧСС = 70 уд/мин до ЧСС<sub>макс</sub> = 200 уд/мин) сегмент S-T уменьшается с 99 мс до 1 мс и интервал T-P уменьшается с 360 мс до 0. Сегмент S-T соответствует фазе быстрого изгнания и соответствует 70% систолического выброса из желудочков. Интервал T-P соответствует фазе быстрого и медленного наполнения (общая диастола предсердий и желудочков) и соответствует 75% наполнения желудочков.

Уменьшение продолжительности интервалов сегмента S-T и интервала T-P практически до 0 будет сопровождаться уменьшением продолжительности систолы и диастолы желудочков, и как следствие уменьшением ударного объема левого желудочка и фракции выброса с 90% до 70%. Восстановление коронарного кровотока по желудочкам возможно только во время электрической систолы предсердий, которая в два раза короче, чем электрическая систола желудочков. Минимальные значения сегмента S-T (0-1 мс) и интервала T-P (0-1 мс) определяют максимальную частоту сердечных сокращений.

#### Список литературы

1. Гайтон, А.К. Медицинская физиология / А.К. Гайтон, Д.Э. Холл / Пер. с англ.; под ред. В.И. Кобрин. – М.: Логосфера, 2008. – 1296 с.
2. Горбенко, А.В. Спортивное сердце: норма или патология / А.В. Горбенко, Ю.П. Скирденко, Н.А. Николаев, О.В. Замахина, С.А. Шерстюк, А.В. Ершов // Патология кровообращения и кардиохирургия. – 2020. – Том. 24, № 2. – С. 16-25.
3. Воробьев, Л.В. Метод определения должного интервала P-Q скорректированного по ЧСС / Л.В. Воробьев // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 5-2. – С. 230-234.
4. Воробьев, Л.В. Способ определения времени сегмента ST в зависимости от частоты сердечных сокращений / Л.В. Воробьев // Научное обозрение. Медицинские науки. – 2020. – № 4. – С. 17-22.
5. Платонов В.Н. Система подготовки спортсменов в олимпийском спорте. Общая теория и ее практические приложения / В.Н. Платонов. – К.: Олимпийская литература, 2004. – 808 с.
6. Талибов, А.Х. Критерии оценки эхокардиографических показателей у спортсменов / А.Х. Талибов, М.А. Фадейкин, Е.С. Дмитриева // Ученые записки университета имени П.Ф. Лесгафта. – 2015. – Том. 3, № 121. – С. 142-146.
7. Тихоненко, В.М. Нарушения ритма и проводимости сердца у здоровых людей / В.М. Тихоненко, Т.Э. Тулинцева, О.В. Лышова и др. // Вестн. аритмологии. – 2018. – № 91. – С. 11-18.
8. Bazett, H. An analysis of the time-relations of electrocardiograms / H. Bazett // Ann Noninvasive Electrocardiol. 1997. – Vol. 2, No. 2. – P. 177-194

**Тюрюмин Я.Л.** «Спортивное» сердце: ЧСС максимальная и ЭКГ // Материалы всероссийской с международным участием научно-практической конференции «Актуальные медико-биологические проблемы спорта и физической культуры» (1-2 февраля 2023 г). – Волгоград, 2023. – Ч. I. – с. 357-362.