

ВНУТРЕННИЕ БОЛЕЗНИ INTERNAL DISEASES

МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ КАРДИОРЕСПИРАТОРНОГО НАГРУЗОЧНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ В МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

РЕЗЮМЕ

Кириянов А.Б.¹,
Кожевникова И.С.^{1, 2, 3},
Фаркова А.А.¹,
Аникина Н.Ю.³,
Юрьева Е.В.¹,
Амелина А.И.¹

¹ ФГАОУ ВО «Северный (Арктический)
федеральный университет
имени М.В. Ломоносова» (163000,
г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17,
Россия)

² ФГБУН «Федеральный
исследовательский центр
комплексного изучения Арктики
имени академика Н.П. Лаверова
УрО РАН» (163020, г. Архангельск,
просп. Никольский, 20, Россия)

³ ФГБОУ ВО «Северный государственный
медицинский университет» Минздрава
России (163069, г. Архангельск,
просп. Троицкий, 51, Россия)

Автор, ответственный за переписку:
Кириянов Артём Борисович,
e-mail: a.kiryanov@narfu.ru

Большинство тестов оценивают физиологию в состоянии покоя, тогда как многие симптомы возникают при физической нагрузке, а физическая активность является неотъемлемой частью здорового функционирования и качества жизни человека. На сегодняшний день кардиореспираторное нагрузочное тестирование считается стандартом для выявления ограничений физических нагрузок и дифференциации их причин.

Кардиореспираторные нагрузочные тесты широко используются как в фундаментальных, так и в новейших исследованиях – от кардиологии и пульмонологии до неврологии и гематологии – и имеют большую прогностическую ценность. Кардиореспираторное нагрузочное тестирование рассматривается как золотой стандарт неинвазивной оценки состояния сердечно-лёгочной системы и физической работоспособности. Ещё большую актуальность и востребованность данное исследование приобрело в связи со вспышкой коронавирусной инфекции COVID-19; сейчас оно играет важную роль в клинической оценке выздоравливающих пациентов, перенёвших COVID-19.

Многочисленные показатели, зафиксированные на каждом этапе проведения исследования, в совокупности позволяют получить полную картину работы сердечно-сосудистой, дыхательной и мышечной систем, а также изучить особенности метаболического ответа организма в ответ на нагрузку.

Данная статья содержит обзор литературы по истории применения и развития метода кардиореспираторного нагрузочного тестирования, его физиологическую характеристику и исследование литературы в области применения кардиореспираторного нагрузочного тестирования в медицине за последние 5 лет. Поиск и анализ статей проводились с использованием наукометрических баз данных PubMed, ScienceDirect, Google Academia. Представленная статья может быть полезна для молодых специалистов в области функциональной диагностики, кардиологии и пульмонологии, а также для научных работников и аспирантов, деятельность которых связана с применением метода кардиореспираторного нагрузочного тестирования.

Ключевые слова: кардиореспираторное нагрузочное тестирование, КРПТ, COVID-19, сердечная недостаточность

Для цитирования: Кириянов А.Б., Кожевникова И.С., Фаркова А.А., Аникина Н.Ю., Юрьева Е.В., Амелина А.И. Методика применения кардиореспираторного нагрузочного тестирования в медико-биологической практике (обзор литературы). *Acta biomedica scientifica*. 2024; 9(4): 35-48. doi: 10.29413/ABS.2024-9.4.5

Статья поступила: 20.09.2023

Статья принята: 12.07.2024

Статья опубликована: 25.09.2024

CARDIOPULMONARY EXERCISE TEST IN MEDICAL AND BIOLOGICAL PRACTICE (LITERATURE REVIEW)

Kiryanov A.B.¹,
Kozhevnikova I.S.^{1, 2, 3},
Farkova A.A.¹,
Anikina N.Yu.³,
Yurieva E.V.¹,
Amelina A.I.¹

¹ Northern (Arctic) Federal University
named after M.V. Lomonosov
(Severnoy Dviny embankment 17,
Arkhangelsk 163000, Russian Federation)

² N. Laverov Federal Center
for Integrated Arctic Research, Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences
(Nikolsky Ave. 20, Arkhangelsk 163020,
Russian Federation)

³ Northern State Medical University
(Troitsky Ave. 51, Arkhangelsk 163069,
Russian Federation)

Corresponding author:
Artem B. Kiryanov,
e-mail: a.kiryanov@narfu.ru

ABSTRACT

Most tests assess physiology at rest, whereas many symptoms occur with physical exertion, and physical activity is an integral part of healthy functioning and quality of life of a person. Today, cardiopulmonary exercise testing is considered the standard for identifying exercise limitations and differentiating their causes.

Cardiopulmonary exercise testing is widely used in both basic and the latest research from cardiology and pulmonology to neurology and hematology and has great prognostic value. Cardiopulmonary exercise testing is considered the gold standard for non-invasive assessment of the cardiopulmonary system and physical performance. This study has become even more relevant and in demand due to the COVID-19 outbreak; now it plays an important role in the clinical assessment of recovering patients who have had COVID-19.

Numerous indicators recorded at each stage of the study, taken together, allow us to obtain a complete picture of the work of the cardiovascular, respiratory and muscular systems, as well as to study the characteristics of the metabolic response to stress. This article contains a review of the literature on the history of the application and development of the cardiopulmonary exercise testing, its physiological characteristics and a study of the literature concerning application of studied method in medicine over the past 5 years. The search and analysis of articles were carried out using the scientometric databases PubMed, ScienceDirect, Google Academia.

The presented article may be useful for young specialists working in functional diagnostics, cardiology and pulmonology, as well as for researchers and postgraduates whose work involves application of the cardiopulmonary exercise testing method.

Key words: cardiopulmonary exercise testing, CPET, COVID-19, heart failure

Received: 20.09.2023
Accepted: 12.07.2024
Published: 25.09.2024

For citation: Kiryanov A.B., Kozhevnikova I.S., Farkova A.A., Anikina N.Yu., Yurieva E.V., Amelina A.I. Cardiopulmonary exercise test in medical and biological practice (literature review). *Acta biomedica scientifica*. 2024; 9(4): 35-48. doi: 10.29413/ABS.2024-9.4.5

ВВЕДЕНИЕ

Кардиореспираторное нагрузочное тестирование (КРНТ) – это нагрузочный тест, применяемый как для диагностической, так и для прогностической оценки физической выносливости организма путём изучения субмаксимальной и пиковой реакции на нагрузку, затрагивающей лёгочную, сердечно-сосудистую, гемопоэтическую, нейropsychологическую и скелетно-мышечную системы.

Сердечно-лёгочный нагрузочный тест – это функциональное исследование, которое помогает выявить нарушения, влияющие на процессы, связанные с транспортировкой и потреблением кислорода, путём анализа газообмена во время физической активности. Клиническое применение этого метода разнообразно и включает в себя диагностику, оценку клинической эффективности и прогнозирование исходов в различных контекстах.

Целью данной статьи является характеристика методики проведения кардиореспираторных нагрузочных тестов, их физиологических, морфологических и методических особенностей, а также целей и задач, достигаемых при помощи данного метода в медико-биологической практике.

Для написания обзора были изучены научные публикации, изданные в период с 2019 по 2024 г. Поиск и анализ статей проводились с использованием наукометрических баз данных PubMed, ScienceDirect, Google Academia по ключевым словам: CPET, cardiopulmonary exercise test, gas exchange, COVID-19, pulmonary hypertension. Для изучения наиболее современных исследований применялся фильтр по дате издания не ранее 2018 г., а также учитывалось наличие полного текста статьи и аннотации. После изучения аннотаций было отобрано 46 статей, наиболее подходящих для данного обзора.

ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА

Способность организма выполнять физическую работу напрямую связана с работой скелетных мышц. Скелетным мышцам для того, чтобы выполнять свою функцию, требуется энергия, получаемая из аденозинтрифосфата (АТФ). Во время тренировки гидролиз АТФ обеспечивает энергию, необходимую для образования перекрёстных мостиков в миоцитах и поддержания функции натриево-калиевого насоса. Однако запасы АТФ в мышцах ограничены, и реализация длительной физической нагрузки требует ресинтеза АТФ. Ресинтез АТФ может происходить в реакциях без участия кислорода (анаэробные механизмы) или с его участием (аэробный механизм). Основным источником ресинтеза АТФ во время длительных физических нагрузок являются аэробные пути. Выявив типичные закономерности газообмена, можно определить вклад анаэробных и аэробных механизмов в образовании АТФ. Так, анализ выдыхаемых газов, проведённый во время сердечно-лёгочного тестирования с физической нагрузкой, позволяет исследовать метаболическую потребность организма [1].

Выполнение физической работы обеспечивает не только скелетными мышцами, но и за счёт колоссального вклада сердца и лёгких. Сердечно-сосудистая и дыхательная системы работают сообща, обеспечивая как доставку кислорода (O_2), так и удаление углекислого газа (CO_2) из тканей. Этот процесс состоит из четырёх этапов:

1. Вентиляция лёгких, или движение воздуха в лёгкие и из них.
2. Лёгочная диффузия, или обмен O_2 и CO_2 между лёгкими и кровью.
3. Транспорт O_2 и CO_2 в крови.
4. Капиллярный газообмен, или обмен O_2 и CO_2 между капиллярной кровью и работающей мышцей.
5. Тканевое дыхание.

Первые две стадии известны как внешнее дыхание, так как они обуславливают поступление газа из окружающего воздуха в лёгкие, а затем в кровоток. Четвёртую стадию принято считать внутренним дыханием, поскольку она включает газообмен между кровью и тканями. Эти два процесса объединены системой кровообращения, т. е. транспортной системой [2].

Рассмотрим происходящее более подробно. Вдыхаемый из воздуха кислород (O_2) посредством лёгочной системы поступает в деоксигенированную кровь в малом круге кровообращения. Затем сердечная система перекачивает обогащённую кислородом кровь из лёгочного круга в большой круг кровообращения, где через артериальное сосудистое дерево насыщенная кислородом кровь поступает в капилляры периферического кровообращения, в частности к работающим скелетным мышцам. Митохондрии скелетных мышц утилизируют полученный O_2 для аэробного клеточного энергетического метаболизма, обеспечивающего движение. Затем CO_2 , образованный путём как аэробного, так и анаэробного клеточного метаболизма, поступает от скелетных мышц обратно к сердцу через венозное кровообращение, откуда он выделяется лёгкими [3].

Оптимальная доставка кислорода к тканям зависит от целого набора биологических взаимодействий транспортной цепи O_2 (лёгочная альвеолярная диффузия, оксигенация крови, сердечный выброс, кислород-пропускная способность крови, доставка кислорода к работающим мышцам) [4]. Повышенное потребление кислорода работающими мышцами рассматривается в первую очередь как результат произведения частоты сердечных сокращений (ЧСС) на ударный объём, который может увеличиваться в 6 раз по сравнению с состоянием покоя. Кровь, циркулирующая в кровеносном русле, перераспределяется от дисфункциональных тканей (таких как селезёнка, позвоночник и почки) к скелетным мышцам, что способствует большей доставке O_2 . Приток крови к лёгким увеличивается за счёт увеличения сердечного выброса и расширения лёгочных сосудов. Также происходит увеличение экстракции O_2 из крови по мере того как кровь наполняет мышцы, что приводит к увеличению артериовенозной разницы в поступлении кислорода (AVO_2 , arteriovenous oxygen difference) [2].

Минутная вентиляция лёгких (VE) у здоровых людей увеличивается пропорционально увеличению скорости упражнений. Во время вдоха только часть поступившего воздуха достигает альвеол, где в лёгких происходит газообмен. Воздух, оставшийся в дыхательных путях и не принимающий участия в обмене газов, носит название объёма мёртвого пространства (VD, dead-space ventilation). Расширение дыхательных путей во время физической нагрузки приводит к увеличению мёртвого пространства, однако за счёт увеличения дыхательного объёма удаётся сохранить нормальное вентиляционно-перфузионное соотношение, т. е. поддерживается адекватная альвеолярная вентиляция и, следовательно, газообмен.

Следует отметить, что вентиляционно-перфузионное соотношение может изменяться при различных патологиях. Например, при многих респираторных заболеваниях происходит повреждение здоровой лёгочной ткани, что приводит к увеличению мёртвого пространства; соответственно, снижается толерантность к физической нагрузке. Как было отмечено выше, увеличение вентиляции лёгких во время нагрузки должно сопровождаться увеличением кровотока и сердечного выброса соответственно. Однако одним из отличительных признаков хронической сердечной недостаточности является нарушение сердечного выброса в ответ на физическую нагрузку, в связи с чем вентиляция лёгких увеличивается непропорционально метаболическим потребностям для компенсации перфузионной недостаточности. Степень непропорционального увеличения вентиляции лёгких во время физической нагрузки напрямую связана с тяжестью заболевания и является важным прогностическим маркером [2].

КРНТ рассматривается как золотой стандарт неинвазивной оценки состояния кардиореспираторной системы и физической работоспособности. Данный метод может оценить пределы доставки и поглощения кислорода для ресинтеза АТФ.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ КАРДИОРЕСПИРАТОРНЫХ НАГРУЗОЧНЫХ ТЕСТОВ

Во время выполнения КРНТ пациент либо имитирует езду на велосипеде (велозергометре), либо ходит по беговой дорожке (тредмил). Данные о вентиляции и дыхательном газообмене регистрируются с помощью лицевой маски или мундштука. Во время обследования пациент проходит тщательный мониторинг безопасности, включая регистрацию электрокардиограммы, измерение артериального давления и сатурации [5].

Тест начинается с регистрации данных в состоянии покоя (без нагрузки), далее следует лёгкая нагрузка, которая становится всё труднее, пока пациент не утомляется, не достигает $\geq 90\%$ его прогнозируемой максимальной частоты сердечных сокращений или испытывает какие-либо другие клинические показания для прекращения исследования, такие как аритмия, изменение арте-

риального давления или тяжёлые симптомы (одышка, стенокардия, предобморочное состояние) [4, 6].

Выбор протокола тестирования имеет важнейшее значение. Существует несколько протоколов, которые можно использовать как с велозергометром, так и с беговой дорожкой. Некоторые авторы выделяют следующую классификацию в зависимости от изменения скорости работы:

1. С постепенным увеличением (каждую минуту) или протокол упражнений с непрерывным линейным изменением. Эти почти одинаковые протоколы обычно применяются при работе на велозергометре.

2. Многоэтапный протокол упражнений, применяемый на беговой дорожке, т. е. протоколы Брюса или Нотона (изменения происходят каждые 3 мин).

3. Постоянная скорость работы на беговой дорожке или велозергометре (одна и та же скорость работы, обычно в течение 5–30 мин).

Хорошо известно, что статические измерения функции лёгких и сердца (такие как спирометрия и эхокардиография) не всегда хорошо соотносятся с динамическими показателями во время физической нагрузки. Также протоколы тестов с физической нагрузкой, в которых требования к энергии возрастают от этапа к этапу, как правило, имеют более слабую взаимосвязь между измеренным VO_2 и скоростью работы [7].

Выбранный протокол должен быть адаптирован к конкретному человеку. Средняя длительность выполнения физической нагрузки составляет от 8 до 12 мин; за этот период должно возникнуть утомление.

При использовании велозергометра обычно используют протоколы RAMP (raise, activate, mobilise and potentiate), предполагающие увеличение скорости работы с интервалом от 10 до 60 с, что позволяет точно оценить рабочую нагрузку. Наиболее важным аргументом в пользу велозергометра является линейность изменения нагрузки. Используя беговую дорожку, можно изменить наклон и скорость, но не саму нагрузку, так что линейное увеличение нагрузки почти невозможно. С другой стороны, беговые дорожки позволяют выполнять упражнения, которые более характерны для повседневной деятельности большинства людей, например ходьба, бег трусцой, и по этой причине часто хорошо переносятся большинством пациентов. Также упражнения на беговой дорожке задействуют мышцы верхней части тела из-за глобального характера совершаемых движений. Однако повышенное участие мышц верхней части туловища может способствовать возникновению двигательных артефактов в измерении артериального давления, оксиметрии, показателей вентиляции и газообмена [6]. Актуальным вопросом в пользу использования беговой дорожки является потенциально ограниченная способность и привычка ряда субъектов крутить педали. В то время как езда на велосипеде распространена в Европе и Восточной Азии, это не относится к Северной и Южной Америке, где действительно чаще всего используется беговая дорожка. Наконец, беговая дорожка легче выявляет аномалии сердца, зависящие от положения тела, такие как субаортальный

стеноз при обструкции выносящего тракта левого желудочка и митральную недостаточность при пролапсе митрального клапана [4].

Велоэргометры являются популярной альтернативой беговой дорожке в клинических условиях. Эти устройства физически меньше и обычно дешевле, чем большинство беговых дорожек. Упражнения на велотренажёре часто хорошо переносятся большинством людей, но могут быть трудными для тех, у кого нет опыта использования велотренажёра, или для людей с ортопедическими или сосудистыми ограничениями нижних конечностей. Велоэргометр часто считается более безопасным вариантом, чем беговая дорожка, для пациентов с проблемами равновесия или походки. Ещё одним достоинством является тот факт, что на велоэргометре пациент может прекратить езду на велосипеде, как только у него появятся какие-либо проблемы с подвижностью или он не сможет продолжить тест, тогда как те, кто тренируется на моторизованной беговой дорожке, должны сначала подать оператору сигнал о том, что они хотят остановиться, прежде чем лента замедлится и остановится [6].

Стоит помнить, что существует серьёзная проблема реализации нагрузочного тестирования испытуемым, так как один из этапов – это достижение пика нагрузки, что является физически тяжёлым для человека. Пациенты с сердечно-сосудистыми заболеваниями имеют высокий риск возникновения и развития патологических состояний. В связи с этим КРНТ больных проводят только в медицинских учреждениях, имеющих в своём составе реанимационные отделения [5].

ФАЗЫ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕСТИРОВАНИЯ

Фаза проверки. На этапе проверки осуществляется подключение пациента ко всему оборудованию; таким образом, становится возможной визуализация выходных данных. Это даёт возможность убедиться в отсутствии проблем с программным или аппаратным обеспечением до проведения каких-либо измерений и в достоверности и правдоподобности регистрируемых параметров.

Фаза отдыха. Во время отдыха все параметры записываются без выполнения каких-либо упражнений. Это возможность определить, существуют ли какие-либо физиологические параметры покоя, которые могут влиять на выполнение упражнений (например, гипервентиляция покоя). Эта фаза обычно длится не менее 2 минут и до тех пор, пока не будет достигнут стабильный исходный уровень.

Фаза без нагрузки. На этом этапе теста пациент выполняет упражнение без нагрузки. Это позволяет проводить измерения упражнений с нагрузкой от истинной нулевой точки. Существует ограничение для беговой дорожки, так как при её использовании выполнение упражнения без нагрузки невозможно. Поэтому упражнения без нагрузки могут быть действительно выполнены только с использованием велоэргометра с электро-

магнитным торможением, который поможет пациентам поворачивать ноги при низких уровнях нагрузки. Обычно эта фаза длится не более 3 мин.

Фаза нагрузки. На этом этапе тестирования пациент выполняет упражнения с нагрузкой. Для беговой дорожки это приведёт к увеличению скорости и/или наклона. Для велоэргометра применяется увеличение сопротивления, необходимое для вращения педалей. В зависимости от выбранного протокола эта нагрузка может начинаться с низких уровней и увеличиваться через определённые промежутки времени (например, ступенчатые или линейные протоколы) или начинаться с более высоких уровней интенсивности и оставаться постоянной в течение того времени, которое пациент может продолжать упражнения (например, протоколы выносливости). Для велоэргометрии продолжительность этой фазы должна быть не менее 8 минут, чтобы гарантировать, что пациент не остановится из-за чрезмерной нагрузки и/или что важные фазы во время нагрузочного теста не будут пропущены.

Фаза восстановления. Во время фазы восстановления нагрузка снижается, и постоянно отслеживаются переменные, чтобы измерить способность пациента восстанавливаться после выполнения упражнений. Фаза восстановления может быть прекращена, например, когда VO_2 возвращается к 50 % от пиковых значений или частота сердечных сокращений находится в пределах 20 ударов в минуту от предварительных значений в состоянии покоя. Некоторые исследователи рекомендуют регистрировать данные восстановления, после чего данный этап используют для разминки, в течение которого пациент продолжает цикл с уменьшенной нагрузкой, чтобы сохранить приток крови к мышцам и удалить побочные продукты упражнений (например, накопление лактата), т. е. обеспечить венозный возврат и соответствующее восстановление мышц [6].

ИЗМЕРЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ КАРДИОРЕСПИРАТОРНОГО НАГРУЗОЧНОГО ТЕСТА И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА

На всём протяжении кардиореспираторного нагрузочного тестирования производится регистрация и анализ газообмена при физической нагрузке, для этого используются специализированные маски или газоанализаторы. Современные системы измеряют вдыхаемый объём кислорода (VO_2), объём производимого углекислого газа (VCO_2) и выдыхаемого воздуха (VE) [8, 9]. Однако количество измеряемых параметров варьируется от цели исследования и состояния пациента.

VO_2 – это объём кислорода, извлечённый из воздуха, вдыхаемого во время вентиляции лёгких за определённый промежуток времени. Он является ключевым параметром, который воплощает в себе понимание как сердечной, так и лёгочной функции. Уравнение Фика (1) утверждает, что поглощение кислорода (VO_2) равно сердечному выбросу, умноженному на разницу в содержании кислорода в артериях и венах:

$$VO_2 = (SV \cdot HR) \cdot (C_aO_2 - C_vO_2) \quad (1),$$

где VO_2 – поглощение кислорода;

SV – ударный объём (stroke volume),

HR – частота сердечных сокращений (heart rate);

C_aO_2 – содержание кислорода в артериях (arterial oxygen content);

C_vO_2 – смешанное содержание кислорода в венах (venous oxygen content).

В норме во время упражнений с постоянным увеличением нагрузки VO_2 увеличивается экспоненциально до устойчивого состояния, соответствующего пиковым нагрузкам. Однако могут регистрироваться и аномальные изменения кривой VO_2 . Во-первых, это смещение вверх из-за более высокого спроса на потребление O_2 , как это бывает у пациентов с ожирением. Во-вторых, снижение активности окислительных ферментов в скелетных мышцах из-за хронической сердечной недостаточности или ухудшения состояния обуславливает относительно пологий наклон кривой. В-третьих, выравнивание $\Delta VO_2 / \Delta WR$ (соотношения между VO_2 и рабочей нагрузкой (work rate)), так называемая аномалия «хоккейной клюшки», представлена резким и внезапным прерыванием наклона, предвосхищающим ожидаемую пиковую интенсивность. Истощение энергетических запасов пациента приводит к внезапному прекращению потребления кислорода во время нагрузки, что часто встречается при диастолической или систолической дисфункции, ишемии миокарда, регургитации клапанов или состояний, при которых увеличение частоты сердечных сокращений, связанное с нагрузкой, притупляется бета-адреноблокаторами [10].

VO_{2max} отражает максимальную способность человека принимать, транспортировать и использовать кислород и определяет функциональную аэробную способность этого человека. VO_{2max} стал «золотым стандартом» измерения кардиореспираторной подготовленности. У здоровых людей VO_{2max} определяется как плато VO_2 , продемонстрированное анализом серии тестов с постоянной интенсивностью работы [11].

Пик VO_2 соответствует пиковым значениям потребления кислорода при максимальном усилии, выраженным в литрах кислорода в минуту или индексированным в миллилитрах кислорода на килограмм массы тела в минуту. Он описывает максимальное количество энергии, производимой аэробным метаболизмом. Данный параметр может быть использован в качестве универсального маркера, который может отражать тяжесть заболевания у пациентов с сердечной недостаточностью, лёгочной гипертензией, гипертрофической кардиомиопатией, хронической обструктивной болезнью лёгких и рестриктивной болезнью лёгких в дополнение к уровню физической подготовки [12]. VO_{2peak} может быть выражено в процентах от прогнозируемого пикового значения VO_2 . Выделяют установленные прогнозируемые пиковые изменения VO_2 в зависимости от возраста и пола; так, например, они ниже у пожилых людей и у женщин. Стоит отметить, что в большинстве случаев VO_{2peak} равен VO_{2max} у здоровых испытуемых.

Следующим важным показателем является анаэробный порог (AT, anaerobic threshold), используемый для оценки функциональных нарушений, особенно у пациентов с сердечной недостаточностью. Во время начальной (аэробной) фазы тестирования VE увеличивается линейно с потребляемым объёмом кислорода (VO_2) и отражает количество CO_2 , которое аэробно вырабатывается в мышцах. Во время этой фазы уровень лактата в крови практически не изменяется, поскольку выработка молочной кислоты в мышцах минимальна. В то же время во второй половине тренировки потребность мышц в кислороде превышает доставку кислорода, так что метаболизм переключается с аэробного на анаэробный. Этот момент носит название вентиляционного порога (VT, ventilation threshold). Когда метаболизм становится в основном анаэробным, молочная кислота, образующаяся в этот момент, буферизуется анионами бикарбоната, что увеличивает уровень выдыхаемого углекислого газа. Избыток CO_2 , образующийся в процессе буферизации, добавляется к аэробно вырабатываемому CO_2 , вызывая усиленную вентиляцию лёгких на выдохе и усиливая ощущение одышки на более поздних стадиях тренировки. В результате соотношение выдыхаемого CO_2 к поглощению кислорода (пиковый коэффициент дыхательного обмена) увеличивается. Таким образом, значения пикового коэффициента дыхательного обмена выше 1,1 при физической нагрузке свидетельствуют о последовательной активации анаэробного метаболизма. Прерывание физической нагрузки при пиковом коэффициенте дыхательного обмена ниже 1,0 может выражать ограничение мышечного напряжения, возможно, скрывающее гемодинамические или вентиляционные нарушения.

Анаэробный порог обычно косвенно получают из данных VO_2 , VCO_2 и VE, однако он может быть получен напрямую, путём измерения уровня лактата в крови. У здоровых людей вентиляционный порог обычно находится между 40 и 60 % пикового VO_2 и ниже при сердечно-лёгочных заболеваниях.

Непереносимость физической нагрузки коррелирует с низким VO_{2max} . Согласно уравнению Фика (1), это может возникнуть из-за снижения максимальной частоты сердечных сокращений, максимального сердечного выброса (SV) или максимального C_aO_2 , или увеличения минимального C_vO_2 . Так, у пациентов с сердечной недостаточностью регистрируется заметное снижение SV на физическую нагрузку с меньшим снижением максимальной ЧСС и максимального артериального давления.

С другой стороны, заболевания лёгких, дисфункция скелетных мышц и анемия часто оказывают глубокое влияние на VO_{2max} , влияя на содержание кислорода в артериях или венах. Более того, у пациентов с хроническими респираторными расстройствами механическое ограничение вентиляции является ещё одной важной причиной ограничения физических нагрузок; у этих пациентов наблюдается несоответствие между сниженной вентиляционной способностью, проявляющейся неспособностью в достаточной степени увеличить минутную вентиляцию во время интенсивных физических на-

грузок. Таким образом, возникающий респираторный дискомфорт может ограничить физическую работоспособность до того, как наступит фактическое физиологическое ограничение.

Наклон VE/VCO_2 определяет эффективность вентиляции и измеряет количество выдыхаемого воздуха, необходимое для удаления одного литра углекислого газа. Наклон VE/VCO_2 обычно увеличивается с возрастом и изменяется из-за несоответствия вентиляции и перфузии вследствие заболеваний сердечно-лёгочной системы или расстройств обмена веществ. Следует отметить, что единственным параметром, способным предсказать прогноз для пациентов с диастолической сердечной недостаточностью, является тренд VE/VCO_2 (рис. 1) [13].

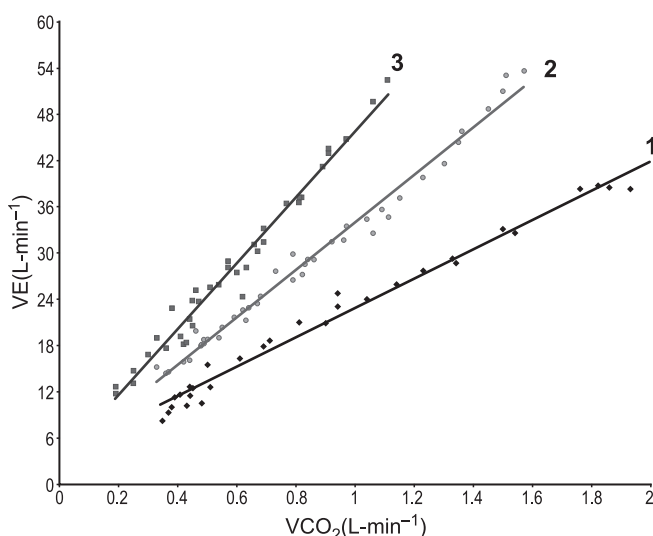


РИС. 1.

Наклон VE/VCO_2 во время постепенного увеличения нагрузки [13]: 1 – у здорового человека; 2 – у пациента с лёгкой сердечной недостаточностью; 3 – у пациента с умеренной сердечной недостаточностью

FIG. 1.

The VE/VCO_2 slope during RAMP incremental exercise [13]: 1 – in a healthy subject; 2 – in a patient with mild heart failure; 3 – in a patient with moderate heart failure ()

Парциальное давление выдыхаемого углекислого газа в конце выдоха (PCO_2 в конце выдоха) определяет состояние перфузии или, точнее, параметр несоответствия вентиляции/перфузии (несоответствие VE/Q). Он обратно коррелирует с сердечным выбросом, заметно снижаясь в условиях нарушения кровообращения, как это происходит при хронической сердечной недостаточности из-за более высокого несоответствия VE/Q . Однако PCO_2 в конце выдоха также может быть снижен при дыхательной дисфункции, при которой отмечается увеличение альвеолярного мёртвого пространства, например при эмфиземе лёгких или лёгочных паренхиматозных заболеваниях, независимо от степени нарушения функции сердца.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КАРДИОРЕСПИРАТОРНОГО НАГРУЗОЧНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ В МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ

Большинство тестов оценивают физиологию в состоянии покоя, тогда как многие симптомы возникают при физической нагрузке, а физическая активность является неотъемлемой частью здорового функционирования и качества жизни. КРНТ в настоящее время считается стандартом для выявления ограничений физических нагрузок и дифференциации их причин. Наиболее широкое применение кардиореспираторные тесты получили в области исследования сердечно-сосудистой и дыхательной систем.

Одышка является распространённым симптомом, сопровождающим многие хронические заболевания органов дыхания, сердечно-сосудистой системы, а также сопутствует таким заболеваниям и состояниям, как рак и ожирение. Несмотря на большой перечень проводимых исследований (лабораторные анализы, визуализация грудной клетки, исследование лёгочной функции), не всегда удаётся выявить причину возникновения одышки и провести дифференциальную диагностику. Однако многие современные исследователи подчёркивают, что сердечно-лёгочное нагрузочное тестирование даёт уникальную возможность раскрыть этиологию, механизмы, лежащие в основе одышки, и их взаимодействие с широким спектром расстройств и является полезным клиническим исследованием [14–16].

В одном исследовании эффективности вентиляции во время физических упражнений при лёгочно-сосудистых заболеваниях было обследовано 59 пациентов с лёгочной артериальной гипертензией ($n = 34$), хронической тромбоэмболической лёгочной гипертензией ($n = 19$) и лёгочной веноокклюзионной болезнью ($n = 6$). Цель исследования состояла в том, чтобы проверить взаимосвязь между показателями газообмена, переносимостью физической нагрузки и маркерами тяжести заболевания у пациентов с заболеваниями лёгочных сосудов в зависимости от наличия гипоксемии в покое ($P_aCO_2 \leq 34$ мм рт. ст.) или нормагемии ($P_aCO_2 = 35–45$ мм рт. ст.). Для этого выполнялось кардиореспираторное нагрузочное тестирование на велоэргометре с отбором проб артериальной крови до исследования и на пике нагрузки. Заданное значение P_aCO_2 оценивали неинвазивно по наибольшему значению конечного PCO_2 (максимального $P_{ET}CO_2$, partial pressure of end-tidal CO_2), наблюдаемому между анаэробным порогом и точкой компенсации дыхания (RCP, respiratory compensation point), когда $PETCO_2$ остаётся постоянным.

Результаты данного исследования позволили сделать следующие выводы: у большинства пациентов наблюдалась гипоксемия в покое, при этом у них отмечалась худшая физическая работоспособность и выраженная гипоксемия при физической нагрузке. Максимальный $PETCO_2$ был самым сильным коррелятом между физической нагрузкой и снижением эффективности вентиляции лёгких в общей популяции и особенно у па-

циентов с гипоканией. Таким образом, пациенты с гипоканией в состоянии покоя имеют ухудшенную сердечную функцию и более серьёзные нарушения газообмена во время физической нагрузки [17].

Лёгочная артериальная гипертензия (ЛАГ) определяется как среднее давление в лёгочной артерии в состоянии покоя ≥ 25 мм рт. ст. ЛАГ вызывает множество осложнений, приводящих к нарушению функции правого желудочка, сердечной недостаточности, нарушению лёгочного газообмена, непереносимости физической нагрузки и одышке. Выполнение КРНТ у таких пациентов позволяет осуществлять диагностику, контроль лечения и прогнозирование [18]. Масштабное исследование более 700 пациентов с хронической одышкой при физической нагрузке с применением КРНТ выявило ЛАГ при физической нагрузке у 296 (41 %), а ЛАГ в покое – у 146 (20 %), однако только у 2 % участников лёгочная гипертензия была диагностирована ранее. Также была продемонстрирована связь ЛАГ с ухудшением функциональной способности и нарушением сократительного резерва правого желудочка [19].

В свою очередь, функциональное тестирование пациентов после тромбоэмболии лёгочной артерии (ТЭЛА) с одышкой при физической нагрузке с помощью КРНТ является целью целого ряда исследований. Так, работа Т.М. Fernandes и соавт. демонстрирует, что в их популяции из 40 пациентов 65 % имели физиологические ограничения для физической нагрузки, проявляющиеся либо увеличением доли вентилиции мёртвого пространства (VD/V_T), снижением резерва ударного объёма (SV_r), либо обоими явлениями [20]. В то же время С. van Kan и соавт. сообщили о серии пациентов с лёгкой и тяжёлой хронической тромбоэмболической лёгочной гипертензией (ХТЭЛГ), за которыми в течение 18 мес. наблюдали, используя неинвазивную КРНТ. В данном исследовании проводилось наблюдение восстановления способности к физической нагрузке у пациентов после лёгочной эндоваскулярной операции. Был отмечен одинаковый уровень толерантности к физической нагрузке при лёгкой и тяжёлой ХТЭЛГ после проведения операции, при этом у 39 % исследуемых в обеих группах восстановления обнаружено не было. Эта подгруппа пациентов также имела значительно более низкие показатели качества жизни, показатели одышки и более короткие шестиминутные расстояния ходьбы [21]. В более раннем исследовании отмечалась лишь умеренная связь предоперационной гемодинамики при ХТЭЛГ с послеоперационной гемодинамикой и послеоперационной толерантностью к физической нагрузке [22].

Приведённые исследования указывают на необходимость детальной и расширенной роли КРНТ в лечении одышки после ТЭЛА, которая оценивает несколько различных аспектов сердечно-лёгочной работоспособности.

В другой публикации была рассмотрена возможность применения инвазивного кардиопульмонального тестирования у пациентов с предполагаемой хронической тромбоэмболией. Согласно предложенному протоколу, катетеризация правых отделов сердца выпол-

няется на столе, оборудованном специализированным велоэргометром, позволяющим выполнять упражнения в положении лёжа. В отличие от вертикального велоэргометра, который может повлиять на качество записи, запись в этом положении на спине подвержена меньшему шуму из-за движения пациента. Стоит отметить, что VO_{2max} , достигнутый в положении лёжа, ниже, чем VO_{2max} в вертикальном положении, однако у пациентов с предполагаемой хронической тромбоэмболией для диагностики достаточно даже субмаксимального значения [23].

Надо заметить диагностическую ценность метода при хронической обструктивной болезни лёгких (ХОБЛ). Хроническая обструктивная болезнь лёгких – истощающее заболевание, характеризующееся ограничением скорости воздушного потока, нарушением физической нагрузки, снижением функциональных возможностей и выраженной сопутствующей системной патологией, что осложняет течение заболевания. Критическое ограничение вдоха для увеличения дыхательного объёма во время физической нагрузки (которое может быть дополнительно осложнено наличием динамической гиперинфляции), нарушения транспорта кислорода и нарушения газообмена являются основными патофизиологическими механизмами непереносимости физической нагрузки у пациентов с ХОБЛ, и, таким образом, нагрузочные тесты традиционно используются для функциональной оценки этих пациентов. Кроме того, КРНТ предоставляет значительную прогностическую информацию и ценные данные для оценки реакции пациента на терапевтические средства и реабилитацию [24].

Вспышка нового тяжёлого острого респираторного синдрома, вызванного коронавирусом (SARS-CoV-2), вызвала глобальную чрезвычайную ситуацию в области общественного здравоохранения. Несмотря на то, что коронавирусная инфекционная болезнь 2019 (COVID-19, coronavirus infectious disease 2019) представляет собой преимущественно пандемию острого респираторного заболевания, она приводит к полиорганному поражению, которое ухудшает сердечно-лёгочную функцию и снижает кардиореспираторную работоспособность. Помимо острых осложнений, медицинское сообщество также сосредоточило свои исследования на долгосрочных последствиях, которые могут быть вызваны COVID-19 [25]. Кардиореспираторное нагрузочное тестирование играет важную роль в клинической оценке выздоравливающих пациентов с COVID-19, а также в исследованиях, направленных на понимание долгосрочных последствий для здоровья инфекции SARS-CoV-2 [26]. Важность этого подчёркивает и опубликованное руководство Национального института здравоохранения и совершенствования медицинской помощи Великобритании (NICE, National Institute for Health and Care Excellence) по длительному COVID, где КРНТ отмечается как основной компонент исследования [27].

Авторы одного из таких исследований отметили, что через 3 месяца после выписки примерно у 1/3 выживших после COVID-19 обнаруживаются функциональные ограничения. В данной работе осуществлялся трёх-

месячный контроль 200 пациентов, перенёвших коронавирусную инфекцию, в рамках которого было проведено КРНТ. В ходе выполнения тестирования причиной прерывания КРНТ были: истощение/усталость ног – у 93,0 % пациентов, одышка – у 5 %, аритмия, вызванная физической нагрузкой, – у 2,0 %. При этом у 99 пациентов $\%pVO_2$ ниже 85 %, что говорит о снижении толерантности к физической нагрузке. Стоит отметить, что у 1/3 (31 из 99) пациентов со сниженным $\%pVO_2$ это, вероятно, было связано с аномальной периферической экстракцией кислорода, связанной с некоторой степенью мышечного поражения. Интересно, что у 80 % пациентов наблюдался хотя бы один инвалидизирующий симптом, не связанный с $\%pVO_2$ или функциональной способностью (одышка, боли в груди, утомляемость и сердцебиение) [28].

Кроме того, другое пилотное исследование показало, что более четверти субъектов, выздоравливающих от COVID-19, имеют недостаточность вентиляции при физических нагрузках, связанную с более низким восстановлением частоты сердечных сокращений [29].

Схожие выводы наблюдаются и в другой работе. Особенностью данного исследования является применение инвазивного кардиопульмонального нагрузочного тестирования. Катетеризацию правых отделов сердца выполняли в положении лёжа с помощью катетера лёгочной артерии с пятью портами, введённого чрескожно под рентгеноскопическим и ультразвуковым контролем во внутреннюю яремную вену, и катетера лучевой артерии, одновременно помещённого в лучевую артерию. Пациентам было проведено инкрементное КРНТ с использованием вертикального велоэргометра с пошаговой оценкой газообмена наряду с непрерывным мониторингом электрокардиографии в 12 отведениях. По результатам исследования пациенты, выздоровевшие от COVID-19, демонстрировали заметно сниженную пиковую аэробную способность по сравнению с участниками контрольной группы. Стоит отметить, что снижение пикового VO_2 было связано с нарушением системной экстракции кислорода, несмотря на сохранённый пиковый сердечный индекс, т. е. произошло снижение периферического, а не центрального сердечного предела наряду с преувеличенной гипервентиляторной реакцией во время физической нагрузки [30].

Авторами другого исследования была поставлена задача проанализировать характеристики КРНТ, выполненной у лиц, перенёвших COVID-19, сравнив пациентов, у которых был синдром пост-COVID-19, с теми, у кого его не было. В данной работе пост-COVID-19-синдром определялся как одышка или утомляемость, сохраняющиеся в течение не менее 45 дней после появления симптомов. Всего в исследование было включено 200 пациентов, имеющих в анамнезе подтверждённый диагноз COVID-19. По результатам многоступенчатого анализа результатов у пациентов с пост-COVID-19-синдромом основной пик VO_2 был значительно ниже по сравнению с бессимптомными субъектами. Кроме того, пациенты с пост-COVID-19-синдромом чаще ощущали усталость и одышку во время КРНТ (52,7 % против 13,7 %)

и реже достигали анаэробного порога (50,9 % против 72,7 %) [31].

Острый патологический процесс может привести к остаточному поражению органов с долгосрочными последствиями [32]. Так, авторы другого исследования использовали сердечно-лёгочный нагрузочный тест для определения необъяснимой одышки у пациентов с постинсультными последствиями инфекции тяжёлого острого респираторного синдрома-коронавируса (PASC, *postacute sequelae of COVID-19*). Основные симптомы PASC включают сильную усталость, когнитивные трудности, неосвежающий сон и миалгии – все симптомы соответствуют диагнозу миалгического энцефаломиелита/синдрома хронической усталости (ME/CFS, *myalgic encephalomyelitis/chronic fatigue syndrome*). Отчёт о данной работе содержит несколько интересных результатов. Почти у всех пациентов (88 %) наблюдалась переменность вентиляции, гипокания в покое и/или чрезмерный дыхательный ответ на нагрузку. У всей выборки со сниженным VO_2 наблюдались нарушения кровообращения при физических нагрузках. Наконец, большой процент (46 %) соответствовал критериям ME/CFS. Таким образом, авторы подчёркивают, что использование КРНТ может быть эффективным для объективного выявления аномалий, связанных с PASC [33].

Особую клиническую ценность КРНТ имеет при тщательной диагностике пациентов с астмой. Бронхиальная астма является распространённым респираторным заболеванием, сопровождающимся нарушением дыхания и приступами удушья, вызываемыми эмоциями, аллергенами или физической нагрузкой. Возможностями метода являются диагностика бронхоспазма, вызванного физической нагрузкой, оценка работоспособности и определение факторов, ограничивающих физическую нагрузку таких пациентов, а также оценка реакции на терапию путём исследования изменений показателей физической нагрузки до и после лечения [34].

Заслуживает внимания такая патология, как обструктивное апноэ сна (ОАС), зачастую связанная с ожирением. ОАС характеризуется множественными эпизодами апноэ и гипопноэ во время сна, связанными с частичным или полным перекрытием верхних дыхательных путей. Во время приступов остановки дыхания в крови падает концентрация кислорода (гипоксия) и растёт концентрация углекислого газа (гиперкапния), что приводит к возникновению респираторного ацидоза. Это состояние приводит к последующему снижению частоты дыхания и суточной вентиляции лёгких. В одном исследовании было обследовано 147 пациентов с ожирением от умеренной до тяжёлой степени с ОАС и без него. В настоящее время КРНТ не считается полезным инструментом обследования пациентов с подозрением на обструктивное апноэ сна. Тем не менее, результаты исследования говорят о высокой информативности КРНТ. Так, у пациентов с ожирением от умеренной до тяжёлой степени с ОАС отмечались сниженные аэробные способности и толерантность к физической нагрузке по сравнению с пациентами с ожирением от умеренной до тяжёлой степени без ОАС. Кроме того, у пациентов с ОАС во вре-

мя физической нагрузки наблюдалось снижение максимальной концентрации лактата и его замедленное выведение по сравнению с контрольной группой по возрасту и индексу массы тела, что может свидетельствовать о нарушении гликолитического метаболизма и сниженной толерантности к физической нагрузке [35].

Всё большую распространённость приобретает совместное применение КРНТ и эхокардиографии. Как отмечается в клинических исследованиях, данное объединение методов даёт возможность получения большего количества ценной информации при таких состояниях, как сердечная недостаточность, лёгочная гипертензия, клапанная болезнь сердца, кардиомиопатия и ишемическая болезнь сердца [13].

Определение переносимости физической нагрузки и максимального уровня потребления кислорода с помощью кардиореспираторного нагрузочного тестирования позволяет нам пересмотреть подходы к отбору пациентов для трансплантации сердца и уточнить критерии отбора пациентов для хирургического лечения [36].

Стоит выделить применение серийных кардиореспираторных тестов у пациентов с врождённым пороком сердца при долгосрочном наблюдении. Такие пациенты имеют сниженное потребление кислорода pVO_2 и сниженную эффективность вентиляции, на что указывает повышенная вентиляция до выхода углекислого газа или наклон VE/VCO_2 . Благодаря КРНТ возможно осуществлять оценку прогрессирования заболевания, оценку воздействия терапевтического вмешательства и оценку трансплантата, а также определить возможную физическую нагрузку [37].

Одним из наиболее распространённых наследственных моногенных заболеваний является серповидноклеточная анемия. При данном заболевании эритроциты содержат так называемый S-гемоглобин вместо нормального А-гемоглобина, что и делает их похожими на серпы. Традиционными спутниками данного заболевания являются хроническая кислородная недостаточность (гипоксия) и непереносимость физической нагрузки. Данный факт нашёл своё подтверждение в работе учёных из Огайо. Ими было показано, что пациенты с серповидноклеточной анемией быстрее переходят на анаэробный метаболизм и имеют худшую адаптационную реакцию на физическую нагрузку, в отличие от группы контроля. Также была отмечена возможность использования субмаксимального КРНТ для прогнозирования максимальной физической нагрузки [38].

Стоит обратить внимание на применение КРНТ за пределами прицельного изучения сердечно-лёгочных заболеваний.

Хроническая болезнь почек, особенно терминальная стадия заболевания, связана с повышенным риском сердечно-сосудистых осложнений, чаще обусловленных атеросклерозом и гипертонией. Стоит отметить, что более половины смертей у этих пациентов связано с сердечно-сосудистыми заболеваниями [39]. В поперечном исследовании кардиореспираторной выносливости приняло участие 30 пациентов, перенёсших перитониальный диализ (ПД), и 23 здоровых человека со-

ответствующего возраста. В рамках проведения КРНТ фиксированная рабочая нагрузка добавлялась каждую минуту до утомления, а дыхательные параметры регистрировались автоматическим газоанализатором с интервалами в 10 с.

В ходе анализа результатов было отмечено, что пиковое потребление кислорода ($16,39 \pm 0,83$ против $25,77 \pm 1,33$ мл/кг/мин; $p < 0,001$) и потребление кислорода на уровне анаэробного порога ($9,61 \pm 0,34$ против $14,55 \pm 0,64$ мл/кг/мин; $p < 0,001$) у пациентов, перенёсших ПД, были ниже, чем у здоровых лиц контрольной группы, и оба этих параметра коррелировали с индексом массы тела и размером левого предсердия. Также было отмечено снижение парциального давления углекислого газа в конце выдоха и эффективности потребления кислорода [40].

Необходимость оценки воздействия заболевания на лёгочную функцию, сердце и опорно-двигательный аппарат есть и у пациентов с саркоидозом. Саркоидоз – это мультисистемное, гранулематозное заболевание неизвестной этиологии с поражением лёгких в 90 % случаев. Стоит сказать, что проведённые ранее некоторые исследования доказали надёжность КРНТ в выявлении нарушений лёгочного газообмена на ранних стадиях болезни [24]. В одном из исследований, посвящённых изучению функциональной способности пациентов с саркоидозом на разных стадиях, была установлена связь параметров, измеряемых при кардиореспираторном тестировании с тяжестью заболевания. Так, VE/VCO_2 и АТ пропорционально увеличивались от первой стадии к четвёртой, что говорит об усиливающемся нарушении газообмена. В свою очередь, соотношение VO_2/HR , носящее название «кислородный пульс», значительно снижалось на поздних стадиях, что также может служить прогностическим фактором саркоидоза [40].

Стоит отметить ценность проведения КРНТ при беременности. КРНТ обладает потенциалом для оценки и выявления женщин, подверженных высокому риску развития множества состояний (например, гестационного сахарного диабета, преждевременных родов и сердечных приступов у матери) во время беременности, поэтому проведение единой оценки для раннего выявления может служить ориентиром в планах профилактики и лечения хронических заболеваний [41].

Во время беременности женщина может испытывать усиливающееся чувство одышки. До 70 % женщин сообщили об усилении ощущения респираторного дискомфорта при физической активности на протяжении всей беременности. Хотя частота дыхания не меняется, во время беременности наблюдается значительное увеличение дыхательного объёма, что коррелирует с увеличением минутной вентиляции лёгких по сравнению с небеременным состоянием. Эти вентиляционные приспособления обусловлены, по крайней мере частично, притоком гормонов прогестерона и эстрогена, которые влияют на центральный вентиляционный хеморефлекс, снижая порог содержания углекислого газа, что приводит к увеличению вентиляции лёгких. Увеличение хемочувствительности повышает соотно-

шение VE/VCO_2 (также известное как «вентиляционная эффективность»).

Приведённые изменения респираторных показателей указывают на важность создания стандарта проведения кардиореспираторного нагрузочного теста для работы с беременными, учитывающего физиологические изменения, происходящие в женском организме в этот период.

Примечательным является использование кардиопульмонального тестирования у пациентов с тяжёлым остеоартритом. В одном исследовании 15 пациентов с остеоартрозом, которым было назначено тотальное эндопротезирование тазобедренного или коленного сустава, выполняли нагрузочное тестирование на велоэргометре, тредмиле, эллиптическом кросс-тренажёре и ручном эргометре. Целью исследования являлось перекрёстное сравнение четырёх видов упражнений. Результаты работы показали, что пик VO_2 был выше при применении методов, использующих поражённые остеоартрозом нижние конечности (беговая дорожка, кросс-тренажёр и велотренажёр) по сравнению с эргометрией рук, при которой использовалась только верхняя часть тела. В частности, пиковые значения VO_2 были примерно на 20–30 % ниже при использовании эргометрии рук по сравнению с тремя другими методами, несмотря на то, что это был единственный метод, который не увеличивал показатели боли при пиковой нагрузке. Анаэробный порог был примерно на 25–50 % ниже на ручном эргометре по сравнению с тремя другими методами. Эти результаты указывают на то, что, несмотря на наличие тяжёлого остеоартрита нижних конечностей, методы КРНТ, использующие эти суставы, могут обеспечить более репрезентативные пиковые значения VO_2 и анаэробного порога, чем эргометрия рук [42].

Хотелось бы отметить интересное ирландское исследование применения кардиореспираторного тестирования в хирургии верхних отделов желудочно-кишечного тракта. В ходе исследования было установлено, что пациенты, перенёсшие операции на желудочно-кишечном тракте, с более низкими значениями анаэробного порога и/или более низкой скоростью потребления кислорода имеют повышенный риск послеоперационной летальности. Однако выявляются и противоречивые данные, что даёт основания для проведения подобных исследований с целью установления верной корреляции [43].

Ещё одной возможностью применения кардиореспираторных нагрузочных тестирований является работа с пациентами с нервной анорексией. Нервная анорексия представляет собой расстройство, характеризующееся преднамеренным снижением веса, вызываемым и/или поддерживаемым самим пациентом. Для полноценного выздоровления такие пациенты нуждаются в нутритивной терапии и дозированной физической нагрузке. Однако руководства по лечению расстройств пищевого поведения не включают критерии интенсивности физических упражнений. Поэтому авторы статьи отмечают возможность использования кардиореспираторных тестов для оценки толерантности к физической нагрузке у данной группы пациентов и формирования безопас-

ных и обоснованных критериев интенсивности физических упражнений [44].

Болезнь Паркинсона (БП) представляет собой прогрессирующее нейродегенеративное заболевание, характеризующееся дисфункцией nigrostriарной дофаминергической системы и возникающими в результате двигательными симптомами, такими как брадикинезия, тремор и ригидность. Помимо двигательных симптомов, пациенты с БП также склонны к метаболическим и сердечно-сосудистым нарушениям либо в состоянии покоя, либо во время стрессовых событий, таких как физические нагрузки.

В ходе исследования, посвящённого оценке влияния тренировок на метаболические и сердечно-сосудистые реакции, для 15 больных БП были организованы тренировки с отягощениями, ещё 15 человек выступали в роли контрольной группы. Было установлено, что 12 недель тренировок с отягощениями улучшают силу мышц нижних конечностей, но не влияют на метаболические или сердечно-сосудистые реакции, полученные при субмаксимальной и максимальной интенсивности во время максимальных сердечно-лёгочных проб с нагрузкой у пациентов с болезнью Паркинсона без сопутствующих сердечно-сосудистых заболеваний [45].

Исходя из вышеизложенного видно, что применение кардиореспираторных нагрузочных тестов широко используется как в фундаментальных, так и в новейших исследованиях – от кардиологии и пульмонологии до неврологии и гематологии – и имеет большую прогностическую ценность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кардиореспираторное нагрузочное тестирование – это многоэтапное динамическое исследование, позволяющее объективно оценить реакции организма на нагрузку, а при наличии патологии – выявить патофизиологическую причину ограничения физической работоспособности.

В ходе проведения исследования осуществляется регистрация электрокардиограммы, измерение артериального давления, частоты сердечных сокращений и большого перечня респираторных параметров, таких как вдыхаемый объём кислорода (VO_2), объём производства углекислого газа (VCO_2) и выдыхаемого воздуха. Все представленные показатели в совокупности позволяют получить полную картину работы сердечно-сосудистой, дыхательной и мышечной систем, а также особенности метаболического ответа организма в ответ на нагрузку, что имеет большое диагностическое и прогностическое значение.

Таким образом, получив своё развитие в XX веке в области спортивной медицины, КРНТ уверенно переходит в клиническую медицину, где с каждым годом доказывает свою пригодность и эффективность для изучения различных состояний, начиная от одышки и ишемической болезни сердца до ожирения и хронической почечной недостаточности.

Конфликт интересов

Авторы данной статьи сообщают об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Derek T. Cardiopulmonary exercise testing. *Methods Mol Biol.* 2018; 1735: 285-295. doi: 10.1007/978-1-4939-7614-0_18
2. Umapathi KK, Nguyen H. *Cardiopulmonary fitness*. StatPearls Publishing; 2024.
3. Andonian BJ, Hardy N, Bendelac A, Polys N, Kraus WE. Making cardiopulmonary exercise testing interpretable for clinicians. *Curr Sports Med Rep.* 2021; 20(10): 545-552. doi: 10.1249/JSR.0000000000000895
4. Triantafyllidi H, Birmipa D, Benas D, Trivilou P, Fambri A, Iliodromitis EK. Cardiopulmonary exercise testing: The ABC for the clinical cardiologist. *Cardiology.* 2022; 147(1): 62-71. doi: 10.1159/000520024
5. Красичков А.С., Мбазумутима Э., Шикама Ф., Нифонтов Е.М. Метод прогнозирования основных показателей кардиопульмонального нагрузочного тестирования для больных с хронической сердечной недостаточностью. *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника.* 2020; 23(1): 96-104. [Krasichkov AS, Mbazumutima E, Shikama F, Nifontov EM. A method for predicting the main indicators of cardiopulmonary stress testing for patients with chronic heart failure. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics.* 2020; 23(1): 96-104. (In Russ.)). doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-1-96-104
6. Pritchard A, Burns P, Correia J, Jamieson P, Moxon P, Purvis J, et al. ARTP statement on cardiopulmonary exercise testing 2021. *BMJ Open Respir Res.* 2021; 8(1): e001121. doi: 10.1136/bmjresp-2021-001121
7. Smith EJ, Gartman EJ. The clinical utility of cardiopulmonary exercise testing. *Rhode Island Med J.* 2021; 104(7): 14-19.
8. Glaab T, Schmidt O, Fritsch J. Spiroergometrie kompakt – Physiologie, Durchführung und Auswertung. *Pneumologie.* 2020; 74(02): 88-102. doi: 10.1055/a-1069-0611
9. Semper H, Kühnelt P, Seipp P. Spiroergometrie – Schritt für Schritt. *Dtsch Med Wochenschr.* 2019; 144: 39-45. doi: 10.1055/a-0600-9233
10. Chaumont M, Forton K, Gillet A, Tcheutchoua Nzokou D, Lamotte M. How does the method used to measure the VE/VCO₂ slope affect its value? A cross-sectional and retrospective cohort study. *Healthcare (Basel).* 2023; 11(9): 1292. doi: 10.3390/healthcare11091292
11. Pella E, Boutou A, Boulmpou A, Papadopoulos CE, Paggianni A, Sarafidis P. Cardiopulmonary exercise testing in patients with end-stage kidney disease: Principles, methodology and clinical applications of the optimal tool for exercise tolerance evaluation. *Nephrol Dial Transplant.* 2022; 37(12): 2335-2350. doi: 10.1093/ndt/gfab150
12. Pella E, Boutou A, Theodorakopoulou MP, Sarafidis P. Assessment of exercise intolerance in patients with pre-dialysis CKD with cardiopulmonary function testing: Translation to everyday practice. *Am J Nephrol.* 2021; 52(4): 264-278. doi: 10.1159/000515384
13. Santoro C, Sorrentino R, Esposito R, Lembo M, Capone V, Rozza F, et al. Cardiopulmonary exercise testing and echocardiographic exam: An useful interaction. *Cardiovasc Ultrasound.* 2019; 17(1): 29. doi: 10.1186/s12947-019-0180-0
14. Berton DC, Mendes NBS, Olivo-Neto P, Benedetto IG, Gazzana MB. Pulmonology approach in the investigation of chronic unexplained dyspnea. *J Bras Pneumol.* 2021; 47(1): e20200406. doi: 10.36416/1806-3756/e20200406
15. Louvaris Z, Langer D, Gosselink R. Detailing the mechanisms of chronic dyspnea in patients during cardiopulmonary exercise testing. *J Bras Pneumol.* 2021; 47(1): e20210014. doi: 10.36416/1806-3756/e20210014
16. Neder JA, Berton DC, Nery LE, Tan WC, Bourbeau J, O'Donnell DE; Canadian Cohort of Obstructive Lung Disease (Can-COLD) Collaborative Research Group and the Canadian Respiratory Research Network (CRRN). A frame of reference for assessing the intensity of exertional dyspnoea during incremental cycle ergometry. *Eur Respir J.* 2020; 56(4): 2000191. doi: 10.1183/13993003.00191-2020
17. Weatherald J, Boucly A, Montani D, Jaïs X, Savale L, Humbert M, et al. Gas exchange and ventilatory efficiency during exercise in pulmonary vascular diseases. *Arch Bronconeumol (Engl Ed).* 2020; 56(9): 578-585. doi: 10.1016/j.arbres.2019.12.030
18. Sherman AE, Saggar R. Cardiopulmonary exercise testing in pulmonary arterial hypertension. *Heart Failure Clinics.* 2023; 19(1): 35-43. doi: 10.1016/j.hfc.2022.08.015
19. Ho JE, Zern EK, Lau ES, Wooster L, Bailey CS, Cunningham T, et al. Exercise pulmonary hypertension predicts clinical outcomes in patients with dyspnea on effort. *J Am Coll Cardiol.* 2020; 75(1): 17-26. doi: 10.1016/j.jacc.2019.10.048
20. Fernandes TM, Alotaibi M, Strozza DM, Stringer WW, Porszasz J, Faulkner GG, et al. Dyspnea postpulmonary embolism from physiological dead space proportion and stroke volume defects during exercise. *Chest.* 2020; 157(4): 936-944. doi: 10.1016/j.chest.2019.10.047
21. van Kan C, Tramper J, Bresser P, J Meijboom L, Symersky P, Winkelman JA, et al. Patients with CTEPH and mild hemodynamic severity of disease improve to a similar level of exercise capacity after pulmonary endarterectomy compared to patients with severe hemodynamic disease. *Pulm Circ.* 2024; 14(1): e12316. doi: 10.1002/pul2.12316
22. Ruigrok D, Meijboom LJ, Nossent EJ, Boonstra A, Braams NJ, van Wezenbeek J, et al. Persistent exercise intolerance after pulmonary endarterectomy for chronic thromboembolic pulmonary hypertension. *Eur Respir J.* 2020; 55(6): 2000109. doi: 10.1183/13993003.00109-2020
23. McGuire WC, Alotaibi M, Morris TA, Kim NH, Fernandes TM. Chronic thromboembolic disease: Epidemiology, assessment with invasive cardiopulmonary exercise testing, and options for management. *Structural Heart.* 2021; 5(2): 120-127. doi: 10.1080/24748706.2020.1861397
24. Boutou AK, Zafeiridis A, Pitsiou G, Dipla K, Kioumis I, Stanopoulos I. Cardiopulmonary exercise testing in chronic obstructive pulmonary disease: An update on its clinical value and applications. *Clin Physiol Funct Imaging.* 2020; 40(4): 197-206. doi: 10.1111/cpf.12627
25. Mandal S, Barnett J, Brill SE, Brown JS, Denneny EK, Hare SS, et al.; ARC Study Group. 'Long-COVID': A cross-sectional study of persisting symptoms, biomarker and imaging abnormalities following hospitalisation for COVID-19. *Thorax.* 2021; 76(4): 396-398. doi: 10.1136/thoraxjnl-2020-215818

26. Mihalick VL, Canada JM, Arena R, Abbate A, Kirkman DL. Cardiopulmonary exercise testing during the COVID-19 pandemic. *Prog Cardiovasc Dis.* 2021; 67: 35-39. doi: 10.1016/j.pcad.2021.04.005
27. Venkatesan P. NICE guideline on long COVID. *Lancet Respir Med.* 2021; 9(2): 129. doi: 10.1016/S2213-2600(21)00031-X
28. Clavario P, De Marzo V, Lotti R, Barbara C, Porcile A, Russo C, et al. Cardiopulmonary exercise testing in COVID-19 patients at 3 months follow-up. *Int J Cardiol.* 2021; 340: 113-118. doi: 10.1016/j.ijcard.2021.07.033
29. Dorelli G, Braggio M, Gabbiani D, Busti F, Caminati M, Senna G, et al., on behalf of the Respicovid Study Investigators. Importance of cardiopulmonary exercise testing amongst subjects recovering from COVID-19. *Diagnostics (Basel).* 2021; 11(3): 507. doi: 10.3390/diagnostics11030507
30. Singh I, Joseph P, Heerdt PM, Cullinan M, Lutchmansingh DD, Gulati M, et al. Persistent exertional intolerance after COVID-19: Insights from invasive cardiopulmonary exercise testing. *Chest.* 2022; 161(1): 54-63. doi: 10.1016/j.chest.2021.08.010
31. Barbagelata L, Masson W, Iglesias D, Lillo E, Migone JF, Orazi ML, et al. Cardiopulmonary exercise testing in patients with post-COVID-19 syndrome. *Med Clin (Barc).* 2022; 159(1): 6-11. doi: 10.1016/j.medcli.2021.07.007
32. Zhao YM, Shang YM, Song WB, Li QQ, Xie H, Xu QF, et al. Follow-up study of the pulmonary function and related physiological characteristics of COVID-19 survivors three months after recovery. *EclinicalMedicine.* 2020; 25: 100463. doi: 10.1016/j.eclinm.2020.100463
33. Mancini DM, Brunjes DL, Lala A, Trivieri MG, Contreras JP, Natelson BH. Use of cardiopulmonary stress testing for patients with unexplained dyspnea post-coronavirus disease. *JACC Heart Fail.* 2021; 9(12): 927-937. doi: 10.1016/j.jchf.2021.10.002
34. Boutou AK, Daniil Z, Pitsiou G, Papakosta D, Kioumis I, Stanopoulos I. Cardiopulmonary exercise testing in patients with asthma: What is its clinical value? *Respir Med.* 2020; 167: 105953. doi: 10.1016/j.rmed.2020.105953
35. Vecchiato M, Neunhaeuserer D, Quinto G, Bettini S, Gasperetti A, Battista F, et al. Cardiopulmonary exercise testing in patients with moderate-severe obesity: A clinical evaluation tool for OSA? *Sleep Breath.* 2022; 26(3): 1115-1123. doi: 10.1007/s11325-021-02475-0
36. Троцюк Д.В., Медведев Д.С., Чиков А.Е., Зарипова З.А., Макаренко С.В. Возможности оценки функционального состояния организма и прогнозирования исхода оперативного лечения пациентов старших возрастных групп по данным кардиореспираторного нагрузочного тестирования. *Клиническая геронтология.* 2021; 27(3-4): 82-89. [Trotsyuk DV, Medvedev DS, Chikov AE, Zaripova ZA, Makarenko SV. Cardiopulmonary exercise testing for the assessment functional state and prediction surgical treatment outcome in older patients. *Clinical Gerontology.* 2021; 27(3-4): 82-89. (In Russ.)]. doi: 10.26347/1607-2499202103-04082-089
37. Constantine A, Barradas-Pires A, Dimopoulos K. Cardiopulmonary exercise testing in congenital heart disease: Towards serial testing as part of long-term follow-up. *Eur J Prev Cardiol.* 2022; 29(3): 510-512. doi: 10.1093/eurjpc/zwab144
38. Powell AW, Alsaied T, Niss O, Fleck RJ, Malik P, Quinn CT, et al. Abnormal submaximal cardiopulmonary exercise parameters predict impaired peak exercise performance in sickle cell anemia patients. *Pediatr Blood Cancer.* 2019; 66(6): e27703. doi: 10.1002/pbc.27703
39. Wu X, Zhang Y, Wang F, Xiang J. Cardiopulmonary exercise testing to observe subclinical abnormalities in cardiopulmonary function in patients undergoing peritoneal dialysis. *Clin Physiol Funct Imaging.* 2022; 42(4): 269-277. doi: 10.1111/cpf.12756
40. Kiani A, Eslaminejad A, Shafeipour M, Razavi F, Seyyedi SR, Sharif-Kashani B, et al. Spirometry, cardiopulmonary exercise testing and the six-minute walk test results in sarcoidosis patients. *Sarcoidosis Vasc Diffuse Lung Dis.* 2019; 36(3): 185-194. doi: 10.36141/svdl.v36i3.7663
41. Wowdzia JB, Davenport MH. Cardiopulmonary exercise testing during pregnancy. *Birth Defects Research.* 2020; 113(3): 248-264. doi: 10.1002/bdr2.1796
42. Roxburgh BH, Campbell HA, Cotter JD, Reymann U, Williams MJA, Gwynne-Jones D, et al. Cardiopulmonary exercise testing in severe osteoarthritis: A crossover comparison of four exercise modalities. *Anaesthesia.* 2021; 76(1): 72-81. doi: 10.1111/anae.15162
43. Sheill G, Reynolds S, O'Neill L, Mockler D, Reynolds JV, Hussey J, et al. Cardiopulmonary exercise testing in oesophagogastric surgery: A systematic review. *J Gastrointest Surg.* 2020; 24(11): 2667-2678. doi: 10.1007/s11605-020-04696-2
44. Yamashita M, Kawai K, Toda K, Aso C, Suematsu T, Yokoyama H, et al. Cardiopulmonary exercise testing for patients with anorexia nervosa: A case-control study. *Eat Weight Disord.* 2022; 27(8): 3553-3560. doi: 10.1007/s40519-022-01492-6
45. Kanegusuku H, Peçanha T, Silva-Batista C, Miyasato RS, Silva Júnior NDD, Mello MT, et al. Effects of resistance training on metabolic and cardiovascular responses to a maximal cardiopulmonary exercise test in Parkinson's disease. *Einstein (Sao Paulo).* 2021; 19: eAO5940. doi: 10.31744/einstein_journal/2021AO5940

Сведения об авторах

Кириянов Артем Борисович – ассистент кафедры биологии человека и биотехнических систем, ФГАУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», e-mail: a.kiryanov@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5594-6624>

Коженикова Ирина Сергеевна – кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии человека и биотехнических систем, ФГАУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»; старший научный сотрудник, заведующая лабораторией инновационных технологий, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова УрО РАН»; доцент кафедры гигиены и медицинской экологии, ФГБОУ ВО «Северный государственный медицинский университет» Минздрава России, e-mail: i.s.kozhevnikova@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7194-9465>

Фаркова Анна Андреевна – ассистент кафедры биологии человека и биотехнических систем, ФГАУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», e-mail: a.farkova@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6609-3292>

Аникина Наталья Юрьевна – кандидат биологических наук, доцент кафедры медицинской и биологической физики, ФГБОУ ВО «Северный государственный медицинский университет» Минздрава России, e-mail: anikanatalja@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8115-0291>

Юрьева Елизавета Владимировна – студентка кафедры биологии человека и биотехнических систем, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», e-mail: yureva.e.v@edu.narfu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7480-1924>

Амелина Арина Игоревна – студентка кафедры биологии человека и биотехнических систем, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», e-mail: amelina.a.i@edu.narfu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6321-3668>

Information about the authors

Artyom B. Kiryanov – Teaching Assistant at the Department of Human Biology and Biotechnical Systems, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, e-mail: a.kiryanov@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5594-6624>

Irina S. Kozhevnikova – Cand. Sc. (Biol.), Associate Professor at the Department of Human Biology and Biotechnical Systems, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov; Senior Research Officer, Head of the Laboratory of Innovative Technologies, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Associate Professor at the Department of Hygiene and Medical Ecology, Northern State Medical University, e-mail: i.s.kozhevnikova@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7194-9465>

Anna A. Farkova – Teaching Assistant at the Department of Human Biology and Biotechnical Systems, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, e-mail: a.farkova@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6609-3292>

Natalya Yu. Anikina – Cand. Sc. (Biol.), Associate Professor at the Department of Medical and Biological Physics, Northern State Medical University, e-mail: anikinatalja@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8115-0291>

Elizaveta V. Yuryeva – Student at the Department of Human Biology and Biotechnical Systems, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, e-mail: yureva.e.v@edu.narfu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7480-1924>

Arina I. Amelina – Student at the Department of Human Biology and Biotechnical Systems, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, e-mail: amelina.a.i@edu.narfu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6321-3668>