

ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ВЕСОВОЙ НАГРУЗКИ НА ФУНКЦИЮ ВНЕШНЕГО ДЫХАНИЯ

© 2024 г. М. О. Сегизбаева^{1, *}, Б. А. Максименко¹, Ю. Н. Королев², Н. П. Александрова¹

¹ФГБУН Институт физиологии имени И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург, Россия

²ФГБВОУ ВО Военно-медицинская Академия имени С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: segizbaevamo@infran.ru

Поступила в редакцию 27.05.2024 г.

После доработки 10.07.2024 г.

Принята к публикации 16.07.2024 г.

Проведено сравнительное исследование объемно-скоростных показателей системы внешнего дыхания человека в условиях действия дополнительной весовой нагрузки: бронежилета весом 11 кг и рюкзака весом 15 кг. Характер изменений основных спирометрических параметров при действии повышенной весовой нагрузки типичен для рестриктивных нарушений легочной функции. Выраженное снижение значений форсированной жизненной емкости легких (FVC) и объема форсированного выдоха за 1 с (FEV_1) наблюдалось при выполнении теста с защитным бронежилетом. В условиях сочетания бронежилета и рюкзака эти изменения были выражены в большей степени ($p < 0.01$). При этом не отмечено значимых изменений величин индекса Тиффно (FEV_1/FVC). Кроме того, выявлено достоверное снижение значений максимальной произвольной вентиляции легких (MVV) на 8.1% в условиях действия бронежилета и на 18.5% при сочетании жилета и рюкзака относительно контроля ($p < 0.01$). Показана значимая корреляция между максимальной силой сокращений инспираторных мышц и максимальной произвольной вентиляцией легких как в контроле, так и при дополнительной весовой нагрузке. Возможно, что тренировка инспираторных мышц, направленная на увеличение их силы и выносливости, может быть эффективной стратегией для минимизации неблагоприятных последствий увеличенной весовой нагрузки при выполнении работ со специальным защитным оборудованием в разных сферах профессиональной деятельности человека.

Ключевые слова: спирометрия, дыхательные мышцы, максимальное инспираторное давление, максимальная произвольная вентиляция легких, средства защиты грудной клетки, бронежилет, рюкзак.

DOI: 10.31857/S0131164624050035, **EDN:** AOPWFR

Дополнительная весовая нагрузка — общее определение, объединяющее любое внешнее или внутреннее приложение избыточного веса на организм человека. Чаще всего внешняя дополнительная нагрузка в виде укомплектованных рюкзаков, защитных жилетов и специального оборудования локализуется на плечевом поясе и грудной клетке, хотя в разных профессиональных группах дополнительные элементы экипировки могут располагаться на голове (защитные шлемы), ступнях (специальная обувь), бедрах (особое снаряжение), кистях рук. Ряд областей профессиональной деятельности человека требует обязательного использования дополнительных средств защиты грудной клетки. При этом часто выполнение работ в защитных жилетах сочетается с необходимостью перемещения тяжелых грузов, что значительно увеличивает общую весовую нагрузку.

Дополнительная весовая нагрузка ограничивает подвижность грудной клетки, способствует увеличению эластического сопротивления и изменяет механику дыхания. Преодоление возросшего эластического сопротивления обеспечивается усиленной работой дыхательной мускулатуры. В настоящее время накоплен достаточно богатый экспериментальный материал о влиянии использования укомплектованных рюкзаков разного веса на функцию системы дыхания как в покое, так и при выполнении мышечной нагрузки [1–6]. Исследованиями разных авторов установлено, что дополнительный вес в виде рюкзака оказывает негативное влияние на легочную функцию. Было показано, что как FVC , так и FEV_1 снижаются под действием укомплектованного рюкзака весом от 6 кг и выше, имитируя легкие рестриктивные заболевания легких [4, 7 и др.]. Согласно литературным данным, оптимально допустимым считается вес

рюкзака, не превышающий 30—40% от массы тела здорового человека, выполняющего передвижение и перемещение груза в спокойном режиме [8]. В то же время на практике в условиях выполнения особых профессиональных задач возникает необходимость перемещения рюкзаков общим весом до 75 кг, что сопоставимо с массой человека [9].

В литературе крайне мало данных о сочетанном влиянии средств защиты грудной клетки и дополнительного веса в виде укомплектованного рюкзака на объемно-скоростные показатели внешнего дыхания человека [10]. Проведение подобных исследований чрезвычайно актуально в связи с расширением профессиональных сфер, где необходимо сочетание использования средств индивидуальной защиты и специального обмундирования, а также перемещения тяжелого оборудования, что повышает общую весовую нагрузку на организм человека. Целью настоящего исследования явилось изучение влияния профессионального защитного бронежилета и сочетания бронежилета с дополнительной весовой нагрузкой на функцию внешнего дыхания человека в условиях покоя.

МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 9 молодых мужчин-добровольцев — студентов вуза, активно занимающихся общей спортивной подготовкой. Все обследуемые не имели в анамнезе бронхо-легочных, сердечно-сосудистых и нейромышечных заболеваний и не были подвержены острым респираторным вирусным инфекциям в течение предшествующих 2 мес. Все участники исследования были одной возрастной категории, имели сходные антропометрические данные, вели однотипный образ жизни (табл. 1). Испытуемые не имели табачной зависимости и на момент проведения исследования не принимали каких-либо фармацевтических препаратов. Всем участникам исследования была проведена оценка функции внешнего дыхания (ФВД) с помощью спирометра *MicroLoop* (*Fusion Care*, Великобритания) с использованием индивидуальных антибактериальных одноразовых фильтров (*FusionCare*, Великобритания). Измерения проводили в положении стоя: 1) без дополнительной весовой нагрузки (контроль), 2) в условиях использования профессионального средства индивидуальной защиты — наружного бронежилета 6-го класса защиты с полным комплектом плит общим весом 11 кг, и 3) при сочетании использования

указанного бронежилета и воздействия дополнительного веса в виде наполненного песком рюкзака общей массой 15 кг. Временной интервал между тестами составлял 7 дней. В каждом из трех тестирований определяли объемно-скоростные показатели функции внешнего дыхания — функциональную жизненную емкость легких (*FVC*), объем форсированного выдоха в 1-ю секунду (*FEV₁*), пиковую скорость выдоха (*PEF*), пиковую скорость вдоха (*PIF*), индекс Тиффно *FEV₁/FVC*, а также измеряли максимальную произвольную вентиляцию легких (*MVV*) в соответствии с рекомендациями Американского торакального общества (*ATS*) и Европейского респираторного общества (*ERS*) [11]. Эти параметры зависят от функциональных возможностей респираторной мускулатуры, что позволяет косвенно оценить ее функциональный резерв.

Силу сокращений инспираторных мышц оценивали по величине ротового давления, генерируемого во время максимальных произвольных инспираторных усилий (*MIP*) при перекрытых воздухоносных путях. Маневр выполняли от уровня остаточного объема легких. Измерения *MIP* проводили с помощью портативного прибора *RPM* (*FusionCare*, Великобритания) в соответствии с рекомендациями по тестированию дыхательных мышц, разработанными совместно *ATS* и *ERS* в 2002 г. [12]. Согласно им, максимальное давление регистрируется в самом начале маневра и должно поддерживаться, по крайней мере, 1 с (плато давления) в 3—4-секундном усилии. Использовали мягкие латексные загубники, соединенные с одноразовыми антибактериальными фильтрами от производителя оборудования (*FusionCare*, Великобритания). Именно такие загубники плотно облегают ротовую полость и предотвращают даже минимальную утечку воздуха при выполнении форсированных инспираторных и экспираторных маневров [13, 14]. Измерения производили не менее 5 раз с перерывами в 1 мин, в расчет принимали максимальную из достигнутых величин *MIP*.

Статистический анализ данных проводили с использованием пакета статистических программ *Microsoft Excel* и *Statistica 7.0* для *Windows*. Данные представлены как среднее $\pm$ стандартное отклонение $m \pm SD$ с указанием диапазона минимально-максимальных значений. Тест Шапиро—Уилка использовали для оценки нормальности распределения данных. В случае нормального распределения переменных применяли однофакторный и двухфакторный дисперсионный анализ *ANOVA*.

Таблица 1. Антропометрические показатели испытуемых

Возраст (л)	Рост (см)	Вес (кг)	Индекс массы тела
19.22 $\pm$ 1.23 (18–22)	179.2 $\pm$ 4.89 (172–186)	70 $\pm$ 6.46 (62–78)	21.77 $\pm$ 1.54 (19.6–24.0)

Степень корреляционной связи между силой дыхательных мышц и максимальной произвольной вентиляцией легких оценивали по значениям коэффициента корреляции Пирсона. Различия считали статистически значимыми при $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Средние значения объемно-скоростных параметров внешнего дыхания представлены в табл. 2. Анализ результатов проведенного исследования показал, что в условиях действия защитного бронежилета существенно снижаются значения FVC (6.9%), FEV_1 (4.1%), PEF (4.3%), PIF (4.9%) по сравнению с контролем. В условиях сочетания защитного жилета и рюкзака снижение значений этих показателей было более выражено (табл. 2). В то же время не наблюдалось существенных изменений значений индекса Тиффно FEV_1/FVC и PEF . Кроме того, выявлено достоверное снижение значений максимальной произвольной вентиляции легких как при действии только жилета (на 8.1%), так и при сочетании жилета и рюкзака (18.5%) по сравнению с контролем. Характерно, что при действии защитного жилета достижение максимальной произвольной вентиляции легких обеспечивалось за счет значимого увеличения частоты дыхания при снижении величины дыхательного объема по сравнению с контролем (табл. 3). При сочетании жилета и рюкзака такие изменения паттерна дыхания были выражены в большей степени. С увеличением весовой нагрузки скорость инспираторного потока также существенно снижалась, но не наблюдалось изменения отношения длительности вдоха к длительности всего дыхательного цикла (см. табл. 3).

Среднее значение максимального инспираторного давления, отражающего максимальную силу сокращений всех инспираторных мышц, в исследуемой группе добровольцев составило 126.44 мм вод. ст. (108–164). Результаты корреляционного анализа указывают на наличие тесной корреляционной связи между величиной максимальной произвольной вентиляции легких и максимального инспираторного давления в контроле ($r = 0.87$; $p < 0.01$), а также при действии жилета ($r = 0.73$; $p < 0.05$) и при сочетании жилета и рюкзака ($r = 0.67$; $p < 0.05$) (рис. 1). Наряду с этим в условиях действия дополнительной весовой нагрузки при одинаковом инспираторном усилии достигается меньшая величина максимальной вентиляции легких, чем в контрольных условиях при отсутствии дополнительной нагрузки, что свидетельствует о снижении эффективности сокращений дыхательных мышц.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Дополнительный вес, приложенный к плечевому поясу и грудной клетке (рюкзаки, профессиональное обмундирование и оборудование), создает повышенную нагрузку не только на опорно-локомоторную и сердечно-сосудистую системы, но и на респираторную систему человека, способствуя нарушению ее нормальной функции как в покое [1, 2], так и при выполнении физической работы [3, 4, 15–17]. Специализированные профессиональные средства защиты грудной клетки, и в частности бронежилеты, оказывают два вида воздействий на систему дыхания человека — дополнительную весовую нагрузку и механическое ограничение

Таблица 2. Показатели функции внешнего дыхания в контроле и под действием дополнительной весовой нагрузки

Показатель	Контроль	Жилет	Жилет + рюкзак	Ж/К	Ж + Р/К	Ж + Р/Ж
FVC , л	5.37 ± 0.71 (4.66–5.89)	5.0 ± 0.42 (4.41–5.53)	4.91 ± 0.33 (4.4–5.36)	–6.9**	–8.6**	–1.8
FEV_1 , л/с	4.49 ± 0.42 (3.93–4.89)	4.31 ± 0.27 (3.91–4.75)	4.2 ± 0.27 (3.78–4.63)	–4.08*	–6.5**	–2.6
FEV_1/FVC	87.0 ± 8.3 (74–99)	86.0 ± 7.6 (71–96)	86.0 ± 1.11 (70–91)	–1.1	–1.1	0
PEF , л/с	8.84 ± 1.3 (7.7–10.06)	8.56 ± 1.13 (7.38–10.27)	8.44 ± 1.18 (6.89–9.8)	–3.2	–4.52*	–1.4
PIF , л/с	7.69 ± 1.28 (6.89–9.58)	7.35 ± 1.31 (5.94–9.83)	7.26 ± 0.55 (6.3–7.91)	–4.4	–5.6*	–1.2

Примечание: FVC — функциональная жизненная емкость легких, л; FEV_1 — объем форсированного выдоха в первую секунду; FEV_1/FVC — индекс Тиффно, %; PEF — пиковая объемная скорость выдоха, л/мин; PIF — пиковая объемная скорость вдоха, л/мин; MVV — максимальная произвольная вентиляция легких, л/мин; Ж/К, Ж + Р/К, — изменение показателей, измеренных при надетом бронежилете, а также при надетом бронежилете и рюкзаке, выраженное в % к контрольным данным; Ж + Р/Ж — изменение показателей, измеренных при надетом бронежилете и рюкзаке, выраженное в % к показателям, полученным при надетом бронежилете. * — при $p < 0.05$; ** — при $p < 0.01$.

Таблица 3. Максимальная вентиляция легких и ее составляющие в контроле и под действием дополнительной весовой нагрузки

Показатель	Контроль	Жилет	Жилет + рюкзак	Ж/К	Ж + Р/К	Ж + Р/Ж
MVV , л	149.78 ± 13.51 (132–173)	137.72 ± 19.48 (108–157)	122.11 ± 14.24 (105–149)	–8.1**	–18.5**	–11.3*
f , цикл/мин	119.8 ± 10.42 (70–160)	136.11 ± 9.55 (104–175)	137.43 ± 12.43 (99–168)	+13.6**	+14.7**	+1.0
V_T , л	1.28 ± 0.11 (0.86–2.05)	1.04 ± 0.11 (0.65–1.44)	0.91 ± 0.12 (0.61–1.41)	–18.8**	–28.9**	–12.5
T_I/T_T	0.47 ± 0.01 (0.45–0.5)	0.48 ± 0.01 (0.45–0.51)	0.50 ± 0.01 (0.45–0.54)	+2.1	+6.4	+4.1
V_T/T_T , л/с	5.13 ± 0.17 (4.76–6.16)	4.8 ± 0.21 (3.55–5.63)	4.3 ± 0.27 (3.52–5.53)	–6.4*	–16.2*	–10.4

Примечание: MVV – максимальная произвольная вентиляция легких, л; f – частота дыхания, цикл/мин; V_T – дыхательный объем, л; T_I/T_T – отношение длительности вдоха к длительности всего дыхательного цикла; V_T/T_T – отношение дыхательного объема к длительности инспираторной фазы дыхательного цикла – скорость инспираторного потока. Остальные обозначения см. в табл. 2.

подвижности грудной клетки из-за конструктивных особенностей защитных бронежилетов, фиксирующих лямок и ремней. Дополнительный вес, приложенный к грудной клетке, препятствует свободному расширению грудной полости при вдохе и, соответственно, вызывает ограничение рабочих легочных объемов, нарушая нормальное

функционирование системы дыхания [9]. При использовании тяжелого вспомогательного оборудования, перемещаемого на спине, на пояс и в руках, дополнительная нагрузка возрастает пропорционально его весу.

Результаты настоящего исследования показали, что дополнительная весовая нагрузка в виде защитного бронежилета, особенно при сочетании бронежилета и укомплектованного рюкзака суммарным весом 26 кг, даже в условиях покоя вызывает нарушение функции внешнего дыхания. Выраженное снижение FVC и FEV_1 наблюдалось при выполнении теста с защитным бронежилетом. Величина таких изменений при сочетанном действии жилета и рюкзака была более значительной по сравнению с отдельно применяемым жилетом (табл. 2). При этом не отмечено изменений индекса Тиффно (FEV_1/FVC), величина которого снижается при бронхиальной обструкции. Для обструктивных нарушений характерно уменьшение FEV_1 на фоне отсутствия или менее значительного снижения FVC , что и отражается в снижении индекса Тиффно. При рестриктивных нарушениях дыхания индекс Тиффно не изменяется, так как уменьшение FVC и FEV_1 происходит пропорционально. Таким образом, обнаруженный нами характер изменений основных спирометрических параметров при действии повышенной весовой нагрузки, используемой в настоящем исследовании, типичен для рестриктивных нарушений легочной функции.

Подобный паттерн изменений легочной функции наблюдался также в других исследованиях при увеличении веса рюкзака от 10 до 30 кг, причем как у мужчин, так и у женщин [18, 19]. Схожие

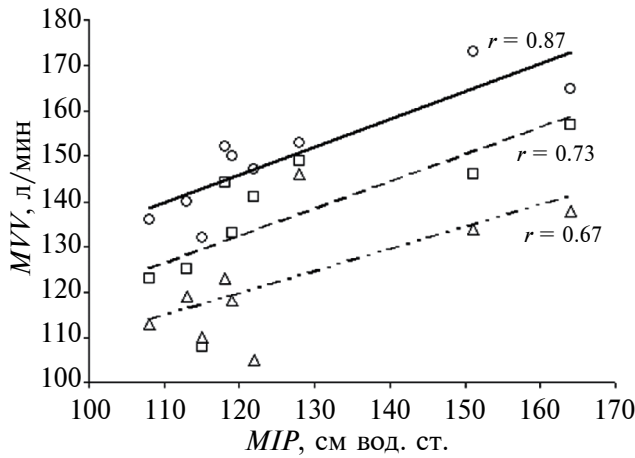


Рис. 1. Корреляционная зависимость между максимальным инспираторным давлением (MIP) и максимальной произвольной вентиляцией легких (MVV) у здоровых добровольцев в контроле при отсутствии дополнительной весовой нагрузки (кружки и сплошная линия тренда), при действии защитного жилета (квадраты и штриховая линия) и сочетании жилета и рюкзака (треугольники и пунктирная линия). Коэффициенты корреляции (r) указаны рядом с линией тренда.

изменения основных объемно-скоростных показателей функции внешнего дыхания были обнаружены под влиянием рюкзака суммарным весом 15 кг при свободном и тесном прилегании лямок [1, 2] или при действии только защитного жилета [3, 20]. Есть данные о снижении FVC , FEV_1 и MVV на 5, 6 и 8% соответственно под действием рюкзака общим весом 25 кг (35% от массы тела обследуемого), при этом такая же дополнительная весовая нагрузка в виде утяжеленного жилета вызывала снижение указанных показателей на 12% [21]. Другими авторами было показано, что FEV_1 снижается в покое на 8% под действием рюкзака массой 35 кг [22], а под действием защитного жилета весом 8 и 10 кг FVC и FEV_1 снижаются соответственно на 4 и 6% [6]. Оубликованы данные, что рюкзак весом 6 кг может вызывать легкий рестриктивный тип вентиляционных нарушений функции легких, причем этот эффект был более выражен при использовании рюкзака с одним ремнем, пересекающим грудную клетку, чем при использовании рюкзака с традиционными двойными плечевыми ремнями [7].

Сходные изменения легочной функции наблюдаются и у пациентов с избыточной массой тела вследствие ограничения движения грудной клетки [23]. Установлено, что, кроме механического ограничения движений грудной клетки, дополнительный вес может повышать транспульмональное давление, приводя к увеличению объема закрытия и, в конечном итоге, к увеличению остаточного объема легких [24, 25]. В таких условиях в первую очередь происходит повышение нагрузки на инспираторные мышцы, которые вынуждены развивать большее усилие для преодоления возросшего эластического сопротивления. При этом дыхательные мышцы вынуждены сокращаться на неоптимальной части кривой длины-напряжения, что также потенциально способствует увеличению работы дыхания [9, 26].

Снижение максимальной произвольной вентиляции легких, обнаруженное в настоящем исследовании при тестировании с дополнительной весовой нагрузкой, позволяет предположить, что в реальных условиях выполнения профессиональных работ с использованием тяжелого обмундирования возможно значительное ухудшение функционального состояния инспираторной мускулатуры и снижение эффективности сокращений дыхательных мышц. В таких условиях диафрагма, инспираторные мышцы грудной клетки и все вспомогательные инспираторные мышцы будут сокращаться в усиленном режиме, обеспечивая прирост вентиляции легких в соответствии с повышенным уровнем метаболических затрат организма. В случае выполнения работ в течение длительного времени появляется вероятность развития утомления инспираторной мускулатуры, что в свою очередь будет способствовать ограничению общей

работоспособности человека. Выявленная в данном исследовании тесная положительная корреляционная зависимость между силой инспираторных мышц и максимальной произвольной вентиляцией легких позволяет предположить, что тренировка их силы и выносливости может быть адекватным методом повышения устойчивости дыхательных мышц к развитию утомления при выполнении работ с дополнительной весовой нагрузкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие выводы. Увеличение дополнительной весовой нагрузки при использовании средств защиты грудной клетки и укомплектованного рюкзака суммарным весом 26 кг вызывает нарушение функции внешнего дыхания по рестриктивному типу в условиях покоя. Наблюдается снижение эффективности сокращений инспираторных мышц и произвольной максимальной вентиляции легких. Выявлена тесная корреляционная зависимость между максимальной силой сокращений инспираторных мышц и максимальной произвольной вентиляцией как в контрольных условиях, так и при действии добавочной весовой нагрузки. Полученные данные позволяют предположить, что тренировка инспираторной мускулатуры, направленная на увеличение ее силы и выносливости, может быть эффективной стратегией для снижения неблагоприятных последствий увеличенной весовой нагрузки и ограничения инспираторных экскурсий грудной клетки, создаваемых бронежилетом и укомплектованным рюкзаком в особых условиях профессиональной деятельности человека.

Финансирование работы. Работа поддержана средствами федерального бюджета в рамках государственного задания ФГБУН Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН (№ 1021062411787-0-3.1.8).

Соблюдение этических стандартов. Все исследования проводились в соответствии с принципами биомедицинской этики, изложенными в Хельсинкской декларации 1964 г. и последующих поправках к ней. Они также были одобрены локальным биоэтическим комитетом Института физиологии им. И.П. Павлова РАН (Санкт-Петербург), протокол № 23-03 от 05.12.2023 г.

Каждый участник исследования дал добровольное письменное информированное согласие после получения разъяснений о потенциальных рисках и преимуществах, а также о характере предстоящего исследования.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Muza S.R., Latzka W.A., Epstein Y., Pandolf K.B.* Load carriage induced alterations of pulmonary function // *Int. J. Ind. Ergon.* 1989. V. 3. № 3. P. 221.
2. *Bygrave S., Legg S.J., Myers S., Llewellyn M.* Effect of backpack fit on lung function // *Ergonomics.* 2004. V. 47. № 3. P. 324.
3. *Majumdar D., Srivastava K.K., Purkayastha S.S. et al.* Physiological effects of wearing heavy body armour on male soldiers // *Int. J. Ind. Ergon.* 1997. V. 20. № 2. P. 155.
4. *Dominelli P.B., Sheel A.W., Foster G.E.* Effect of carrying a weighted backpack on lung mechanics during treadmill walking in healthy men // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2012. V. 112. № 6. P. 2001.
5. *Phillips D.B., Stickland M.K., Petersen S.R.* Ventilatory responses to prolonged exercise with heavy load carriage // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2016. V. 116. № 1. P. 19.
6. *Armstrong N.C., Gay L.A.* The effect of flexible body armour on pulmonary function // *Ergonomics.* 2016. V. 59. № 5. P. 692.
7. *Legg S.J., Cruz C.O.* Effect of single and double strap backpacks on lung function // *Ergonomics.* 2004. V. 47. № 3. P. 318.
8. *Kinoshita H.* Effects of different loads and carrying systems on selected biomechanical parameters describing walking gait // *Ergonomics.* 1985. V. 28. № 9. P. 1347.
9. *Brown P.I., McConnell A.K.* Respiratory-related limitations in physically demanding occupations // *Aviat. Space Environ. Med.* 2012. V. 83. № 4. P. 424.
10. *Armstrong N.C., Ward A., Lomax M. et al.* Wearing body armour and backpack loads increase the likelihood of expiratory flow limitation and respiratory muscle fatigue during marching // *Ergonomics.* 2019. V. 62. № 9. P. 1181.
11. *Miller M.R., Crapo R., Hankinson J. et al.* General considerations for lung function testing // *Eur. Respir. J.* 2005. V. 26. № 1. P. 153.
12. American Thoracic Society/European Respiratory Society. ATS/ERS Statement on respiratory muscle testing // *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2002. V. 166. № 4. P. 518.
13. *Black L.F., Hyatt R.E.* Maximal respiratory pressures: normal values and relationship to age and sex // *Am. Rev. Respir. Dis.* 1969. V. 99. № 5. P. 696.
14. *Сегизбаева М.О., Александрова Н.П.* Оценка функционального состояния дыхательных мышц: методические аспекты и интерпретация данных // *Физиология человека.* 2019. Т. 45. № 2. С. 115.
15. *Faghy M., Brown P.* Thoracic load carriage-induced respiratory muscle fatigue // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2014. V. 114. № 5. P. 1085.
16. *Shei R.J., Chapman R.F., Gruber A.H., Mickleborough T.D.* Respiratory Effects of Thoracic Load Carriage Exercise and Inspiratory Muscle Training as a Strategy to Optimize Respiratory Muscle Performance with Load Carriage // *Springer Sci. Rev.* 2017. V. 5. № 1–2. P. 49.
17. *Faghy M.A., Shei R.J., Armstrong N.C.D. et al.* Physiological impact of load carriage exercise: Current understanding and future research directions // *Physiol. Rep.* 2022. V. 10. № 21. P. e15502.
18. *Walker R.E., Swain D.P., Ringleb S.I., Colberg S.R.* Effect of added mass on treadmill performance and pulmonary function // *J. Strength Cond. Res.* 2015. V. 29. № 4. P. 882.
19. *Phillips D.B., Ehnes C.M., Stickland M.K., Petersen S.R.* Ventilatory responses in males and females during graded exercise with and without thoracic load carriage // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2019. V. 119. № 2. P. 441.
20. *Legg S.J.* Influence of body armour on pulmonary function // *Ergonomics.* 1988. V. 31. № 3. P. 349.
21. *Legg S.J., Mahanty A.* Comparison of Five Models of Carrying a Load Close to the Trunk // *Ergonomics.* 1985. V. 28. № 12. P. 1653.
22. *Dominelli P.B., Sheel A.W.* Experimental approaches to the study of the mechanics of breathing during exercise // *Respir. Physiol. Neurobiol.* 2012. V. 180. № 2–3. P. 147.
23. *Dixon A.E., Peters U.* The effect of obesity on lung function // *Expert Rev. Respir. Med.* 2018. V. 12. № 9. P. 755.
24. *Jenkins S.C., Moxham J.* The effects of mild obesity on lung function // *Respir. Med.* 1991. V. 85. № 4. P. 309.
25. *Sharp J.T., Barrocas M., Chokroverty S.* The cardiorespiratory effects of obesity // *Clin. Chest Med.* 1980. V. 1. № 1. P. 103.
26. *Farkas G.A., Cerny F.J., Rochester D.F.* Contractility of the ventilatory pump muscles // *Med. Sci. Sports Exerc.* 1996. V. 28. № 9. P. 1106.

REFERENCES

1. *Muza S.R., Latzka W.A., Epstein Y., Pandolf K.B.* Load carriage induced alterations of pulmonary function // *Int. J. Ind. Ergon.* 1989. V. 3. № 3. P. 221.
2. *Bygrave S., Legg S.J., Myers S., Llewellyn M.* Effect of backpack fit on lung function // *Ergonomics.* 2004. V. 47. № 3. P. 324.
3. *Majumdar D., Srivastava K.K., Purkayastha S.S. et al.* Physiological effects of wearing heavy body armour on male soldiers // *Int. J. Ind. Ergon.* 1997. V. 20. № 2. P. 155.
4. *Dominelli P.B., Sheel A.W., Foster G.E.* Effect of carrying a weighted backpack on lung mechanics during treadmill walking in healthy men // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2012. V. 112. № 6. P. 2001.

5. *Phillips D.B., Stickland M.K., Petersen S.R.* Ventilatory responses to prolonged exercise with heavy load carriage // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2016. V. 116. № 1. P. 19.
6. *Armstrong N.C., Gay L.A.* The effect of flexible body armour on pulmonary function // *Ergonomics.* 2016. V. 59. № 5. P. 692.
7. *Legg S.J., Cruz C.O.* Effect of single and double strap backpacks on lung function // *Ergonomics.* 2004. V. 47. № 3. P. 318.
8. *Kinoshita H.* Effects of different loads and carrying systems on selected biomechanical parameters describing walking gait // *Ergonomics.* 1985. V. 28. № 9. P. 1347.
9. *Brown P.I., McConnell A.K.* Respiratory-related limitations in physically demanding occupations // *Aviat. Space Environ. Med.* 2012. V. 83. № 4. P. 424.
10. *Armstrong N.C., Ward A., Lomax M. et al.* Wearing body armour and backpack loads increase the likelihood of expiratory flow limitation and respiratory muscle fatigue during marching // *Ergonomics.* 2019. V. 62. № 9. P. 1181.
11. *Miller M.R., Crapo R., Hankinson J. et al.* General considerations for lung function testing // *Eur. Respir. J.* 2005. V. 26. № 1. P. 153.
12. American Thoracic Society/European Respiratory Society. ATS/ERS Statement on respiratory muscle testing // *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2002. V. 166. № 4. P. 518.
13. *Black L.F., Hyatt R.E.* Maximal respiratory pressures: normal values and relationship to age and sex // *Am. Rev. Respir. Dis.* 1969. V. 99. № 5. P. 696.
14. *Segizbaeva M.O., Aleksandrova N.P.* Assessment of the Functional State of Respiratory Muscles: Methodological Aspects and Data Interpretation Muscles // *Human Physiology.* 2019. V. 45. № 2. P. 213.
15. *Faghy M., Brown P.* Thoracic load carriage-induced respiratory muscle fatigue // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2014. V. 114. № 5. P. 1085.
16. *Shei R.J., Chapman R.F., Gruber A.H., Mickleborough T.D.* Respiratory Effects of Thoracic Load Carriage Exercise and Inspiratory Muscle Training as a Strategy to Optimize Respiratory Muscle Performance with Load Carriage // *Springer Sci. Rev.* 2017. V. 5. № 1–2. P. 49.
17. *Faghy M.A., Shei R.J., Armstrong N.C.D. et al.* Physiological impact of load carriage exercise: Current understanding and future research directions // *Physiol. Rep.* 2022. V. 10. № 21. P. e15502.
18. *Walker R.E., Swain D.P., Ringleb S.I., Colberg S.R.* Effect of added mass on treadmill performance and pulmonary function // *J. Strength Cond. Res.* 2015. V. 29. № 4. P. 882.
19. *Phillips D.B., Ehnes C.M., Stickland M.K., Petersen S.R.* Ventilatory responses in males and females during graded exercise with and without thoracic load carriage // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2019. V. 119. № 2. P. 441.
20. *Legg S.J.* Influence of body armour on pulmonary function // *Ergonomics.* 1988. V. 31. № 3. P. 349.
21. *Legg S.J., Mahanty A.* Comparison of Five Models of Carrying a Load Close to the Trunk // *Ergonomics.* 1985. V. 28. № 12. P. 1653.
22. *Dominelli P.B., Sheel A.W.* Experimental approaches to the study of the mechanics of breathing during exercise // *Respir. Physiol. Neurobiol.* 2012. V. 180. № 2–3. P. 147.
23. *Dixon A.E., Peters U.* The effect of obesity on lung function // *Expert Rev. Respir. Med.* 2018. V. 12. № 9. P. 755.
24. *Jenkins S.C., Moxham J.* The effects of mild obesity on lung function // *Respir. Med.* 1991. V. 85. № 4. P. 309.
25. *Sharp J.T., Barrocas M., Chokroverty S.* The cardiorespiratory effects of obesity // *Clin. Chest Med.* 1980. V. 1. № 1. P. 103.
26. *Farkas G.A., Cerny F.J., Rochester D.F.* Contractility of the ventilatory pump muscles // *Med. Sci. Sports Exerc.* 1996. V. 28. № 9. P. 1106.

The Effect of Added Mass on Pulmonary Function

M. O. Segizbaeva^{a, *}, B. A. Maksimenko^a, Yu. N. Korolyov^b, N. P. Aleksandrova^b

^a*Pavlov Institute of Physiology RAS, St. Petersburg, Russia*

^b*S.M. Kirov Military-Medical Academy, St. Petersburg, Russia*

^{*}*E-mail: segizbaevamo@infran.ru*

A comparative study of the volume-velocity parameters of the human external respiration system was carried out under the influence of an additional weight load: a body armor weighing 11 kg and a backpack weighing 15 kg. The nature of changes in the main spirometric parameters under the influence of an added mass is typical for restrictive disorders of pulmonary function. A marked decrease in forced vital capacity (FVC) and forced expiratory volume in 1 second (FEV₁) values was observed when performing the test with a protective vest. In the conditions of a combination of body armor and a backpack, these changes were more pronounced ($p < 0.01$). At the same time, there were no significant changes in the Tiffno index values (FEV₁/FVC). In addition, a significant decrease in the values of maximum voluntary ventilation (MVV) was revealed by 8.1% under the influence of body armor, and by 18.5% with a combination of a vest and a backpack relative to the control ($p < 0.01$). A significant correlation was shown between the maximum force of contraction of the inspiratory muscles and the maximum voluntary ventilation of the lungs both in the control and with an additional weight load. It is possible that the inspiratory muscles training, aimed at increasing their strength and endurance, can be an effective strategy for minimizing the adverse effects of increased weight load when performing work with special protective equipment in various areas of human professional activity.

Keywords: spirometry, respiratory muscles, maximal inspiratory pressure, maximal voluntary ventilation, chest protection, body armor, backpack.