

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАФРАГМЫ КАК ПРЕДИКТОР УСПЕШНОГО ОТЛУЧЕНИЯ ПАЦИЕНТОВ ОТ АППАРАТА ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЛЕГКИХ

Е. А. Сеница, Р. Э. Якубцевич

Гродненский государственный медицинский университет, Гродно, Беларусь



Актуальность проведенного обзора обусловлена сохраняющейся проблемой отлучения пациентов, находящихся на аппаратах искусственной вентиляции легких длительное время.

Цель. Проведение литературного анализа для обобщения результатов современных исследований по изучению сонографических параметров, позволяющих оценить диафрагмальные функции для прогнозирования успешного отлучения пациентов от искусственной вентиляции легких.

Материал и методы. Проанализированы 33 русскоязычных и англоязычных источника.

Результаты. Подробно рассмотрены следующие ультразвуковые показатели диафрагмы: экскурсия диафрагмы, фракция утолщения диафрагмы, диафрагмальный индекс быстрого поверхностного дыхания, время достижения пиковой амплитуды диафрагмы на вдохе.

Выводы. Умение вовремя диагностировать дисфункцию диафрагмы с помощью ультразвукового исследования минимизирует риск развития дыхательной и сердечной недостаточности. В настоящее время существуют методы стимуляции диафрагмальной мышцы для ускорения восстановления утраченных функций.

Ключевые слова: диафрагма, сонографическое исследование, фракция утолщения диафрагмы, диафрагмальный индекс быстрого поверхностного дыхания, время достижения пиковой амплитуды диафрагмы на вдохе, чрескожная электростимуляция диафрагмы.

Для цитирования: Сеница, Е. А. Ультразвуковое исследование диафрагмы как предиктор успешного отлучения пациентов от аппарата искусственной вентиляции легких / Е. А. Сеница, Р. Э. Якубцевич // Журнал Гродненского государственного медицинского университета. 2024. Т. 22, № 1. С. 13-18. <https://doi.org/10.25298/2221-8785-2024-22-1-13-18>

Искусственная вентиляция легких (ИВЛ) – потенциально жизнесберегающее вмешательство для пациентов в отделениях реанимации и интенсивной терапии. Однако наряду с пользой данного метода лечения существует проблема отлучения от механической вентиляции легких пациентов, длительно находящихся на аппаратах ИВЛ. К этой категории относятся пациенты с синдромом полиорганной дисфункции.

Дисфункция диафрагмы остается основной причиной трудностей или неудач при отлучении от ИВЛ. Распространенность неудачных попыток колеблется от 33 до 95%, по данным разных авторов [1]. Дисфункцию диафрагмы у пациентов, госпитализированных в отделение интенсивной терапии, обычно связывают с полиневропатией и миопатией [2].

Неправильное принятие решений относительно готовности к отлучению от ИВЛ и экстубации сопряжено с риском развития дыхательной и сердечной недостаточности, связанной с увеличением работы дыхания во время снижения аппаратной поддержки при отлучении [3]. Установлено, что реинтубация из-за постэкстубационной дыхательной недостаточности увеличивает смертность от 2,5 до 10 раз по сравнению с пациентами, которым реинтубация не требуется [4]. Исходя из данного факта, исследования, направленные на определение наиболее эффективных и действенных методов для оценки готовности отлучения пациентов от аппаратов ИВЛ, приоритетные. В современных условиях использование ультразвуковой навигации в отделениях анестезиологии и реанимации, интенсивной терапии распространено практически повсемест-

но: как на уровне специализированных медицинских центров, так и на уровне центральных районных больниц. Таким образом, научные работы, посвященные ультразвуковому исследованию диафрагмы как критерию отлучения пациентов от аппаратов ИВЛ, – перспективные.

Известно, что основная инспираторная мышца – диафрагма, которая играет ключевую роль в вентиляции легких. Вклад диафрагмы в обеспечение вдоха у здорового человека, по данным разных авторов, составляет 70-80%. В то же время дисфункция данной мышцы по-прежнему остается ведущей причиной трудного и длительного отлучения пациентов от аппарата искусственной вентиляции легких. Так, трудное отлучение определяется необходимостью проведения пациентам до 3 тестов со спонтанным дыханием или временным интервалом до 7 дней между первым тестом со спонтанным дыханием и экстубацией [5]. Длительным считается отлучение с тремя и более неудачными тестами со спонтанным дыханием или 7 и более дней ИВЛ между первым тестом со спонтанным дыханием и экстубацией [6]. При этом доля пациентов, которые были успешно экстубированы после первого теста со спонтанным дыханием (простое отлучение), составляет 59-67%, с трудным отлучением – 20-26% и с длительным отлучением – 13-15% [7, 8].

Основная причина сохраняющейся потребности в ИВЛ – снижение силы и выносливости дыхательных мышц, в том числе и диафрагмы, вследствие длительной вентиляции и седации [5]. Атрофия дыхательных мышц начинается уже спустя 18 часов ИВЛ. Площадь поперечного сечения медленных волокон уменьшается на

57% ($p=0,001$), быстрых – на 53% ($p=0,01$) [9]. С физиологической точки зрения диафрагмальная дисфункция делает невозможным создание необходимого отрицательного давления для адекватного осуществления спонтанной вентиляции [10, 11]. Клинически слабость дыхательной мускулатуры проявляется уменьшением дыхательного объема, увеличением частоты дыхания, удлинением времени вдоха, в целом дискоординацией работы дыхательной мускулатуры и/или участием в акте дыхания вспомогательной дыхательной мускулатуры [12].

В современных условиях отделения анестезиологии и реанимации целесообразно проводить ультразвуковое (УЗ) исследование диафрагмы с помощью портативных УЗ-сканеров для прогнозирования отлучения пациентов от аппарата ИВЛ. К преимуществам данного метода относятся безопасность для пациентов, неинвазивность исследования, возможность использования с целью динамического наблюдения за структурой и функциями диафрагмы, проведение исследования у постели пациента.

Утолщение диафрагмы при дыхании может быть измерено в М- и В-режимах [13]. Для определения фракции утолщения диафрагмы необходимо расположить линейный высокочастотный (10 МГц) датчик в кранио-каудальном направлении в 9 или 10 межреберье вблизи средней подмышечной линии под углом, перпендикулярным грудной стенке. Диафрагма идентифицируется как трехслойный мышечный слой, ограниченный диафрагмальной плеврой и брюшиной [14].

Толщину диафрагмы измеряют в конце выдоха (на уровне функциональной остаточной емкости легких – $tdiFRC$) и в конце спокойного вдоха (на уровне дыхательного объема – Vt), глубокого вдоха (на уровне общей емкости легких – $tdiTLC$) или sniff-маневра ($tdiSniff$) [15].

В М-режиме толщину диафрагмы (рисунок) измеряют от середины плевральной линии до середины перитонеальной линии [16].



Рисунок – Толщина диафрагмы, определенная линейным высокочастотным датчиком в зоне аппозиции, В-режим
Picture – Diaphragm thickness determined by a linear high-frequency sensor in the apposition zone, B-mode

Чтобы минимизировать ошибку, следует выполнить не менее трех измерений каждого параметра. Одни исследователи для анализа используют среднюю величину, другие – наибольшую величину из выполненных измерений [13].

По проведенным измерениям могут быть рассчитаны следующие параметры [17-20]:

- 1) коэффициент утолщения = $tdiTLC/tdiFRC$;
- 2) фракция утолщения диафрагмы при глубоком вдохе (Dtf) = $(tdiTLC - tdiFRC) / tdiFRC$;
- 3) фракция утолщения диафрагмы при sniff-маневре (Stf) = $(tdiSniff - tdiFRC) / tdiFRC$;
- 4) фракция утолщения диафрагмы при спокойном дыхании (Ttf) = $(tdiVt - tdiFRC) / tdiFRC$.

Результаты исследований по теме данного литературного обзора свидетельствуют о том, что выявление дисфункции диафрагмы до того как будет проведена экстубация трахеи позволит снизить риск неудачного отлучения от механической вентиляции [13].

J. Jiang и соавт. определили пороговое значение амплитуды движения диафрагмы, при котором наилучшим образом удается предсказать успех при отлучении пациента от механической вентиляции [20]. Для измерения экскурсии диафрагмы во время спокойного и глубокого дыхания криволинейный низкочастотный датчик (3-5 МГц) необходимо расположить субкостально, параллельно восьмому-десятому межреберью между среднелючичной и среднеподмышечной линиями, при этом луч направляется медиально, краниально и дорсально для измерения диапазона движений в положении пациента лежа на спине. Экскурсия диафрагмы определяется в М-режиме, при этом М-линия располагается перпендикулярно направлению движения, чтобы получить высокие и низкие волны, которые указывают на подвижность диафрагмы [21].

При экскурсии диафрагмы более 11 мм это утверждение верно с чувствительностью и специфичностью, равными, соответственно, 84 и 83%, положительная прогностическая значимость составляет 82%, отрицательная прогностическая значимость – 86%, точность – 84%, причем данный параметр лучше предсказывает успех при экстубации трахеи, нежели традиционные показатели. В исследовании S. Farghaly и A. Nasan пороговое значение данного показателя составило 10,5 мм, при котором чувствительность и специфичность были равны 87 и 71%, соответственно [19].

При принудительной вентиляции экскурсия диафрагмы обусловлена сокращением самой диафрагмы и ее пассивным смещением в результате механической вентиляции [13]. Для адекватной оценки экскурсии диафрагмы необходимо проводить измерения при попытке спонтанного дыхания. Кроме того, надо учитывать, что величина дыхательного объема, активность мышц грудной клетки и брюшной стенки, наличие асцита могут влиять на движение диафрагмы [22].

По мнению M. Umbrello и соавт., толщина и утолщение диафрагмы, в отличие от ее экскурсии при дыхании, точнее отражают сократительную способность диафрагмы при ИВЛ [23].

Е. DiNino и соавт. провели анализ фракции утолщения диафрагмы для оценки предполагаемого успеха экстубации трахеи [18]. В исследование G. Ferragi и соавт. были проспективно включены 46 пациентов. Всем пациентам проводилась вентиляция легких с поддержкой давлением через трахеостомическую трубку. Пациентам проводилась проба спонтанного дыхания, когда они соответствовали всем следующим критериям: $\text{FiO}_2 < 0,5$, $\text{PEEP} \leq 5$ см H_2O , $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2 > 200$, частота дыхания < 30 вдохов в минуту, отсутствие лихорадки, гемодинамическая стабильность без поддержки вазоактивной терапии. В ходе исследования визуализировалась правая часть диафрагмы в зоне аппозиции с помощью линейного ультразвукового датчика частотой 10 МГц. Затем пациенту было предложено выполнить глубокий вдох, а затем глубокий выдох. Неудача при отлучении определялась как неспособность поддерживать самостоятельное дыхание в течение как минимум 48 часов без какой-либо респираторной поддержки. При пороговом значении показателя утолщения диафрагмы, равном 30%, положительный прогноз при экстубации трахеи вероятен с чувствительностью и специфичностью 88 и 71%, соответственно [22]. При увеличении порогового значения фракции утолщения диафрагмы более 36% чувствительность и специфичность равны, соответственно, 82 и 88% [24].

Таким образом, проведенные исследования демонстрируют, что удачная экстубация вероятна при экскурсии диафрагмы более 10,5 мм и при фракции утолщения диафрагмы более 30-36% [13].

Исследование P. Theerawit и соавт. посвящено определению TRIAdia (время достижения пиковой амплитуды диафрагмы на вдохе) [1]. Время достижения пиковой амплитуды диафрагмы на вдохе каждой полудиафрагмы определяется в М-режиме с использованием УЗ датчика с частотой 1-5 МГц во время спокойного дыхания. Измерение выполняется подреберным или межреберным доступом по среднеключичной линии либо по правой или левой передней подмышечной линии. Печень и селезенка идентифицируются как окно для каждой полудиафрагмы. УЗ датчик необходимо располагать в направлении, в котором УЗ луч достигает задней трети соответствующей полудиафрагмы перпендикулярно [25]. Во время вдоха диафрагма перемещается каудально к УЗ датчику, что регистрируется как движение вверх на записи в М-режиме. TRIAdia определяется как время от начала сокращения диафрагмы до максимальной амплитуды инспираторной экскурсии диафрагмы, измеренной при записи в М-режиме [1].

Всего были проанализированы 62 пациента. Средний TRIA значительно выше в группе успешного отлучения от аппарата ИВЛ (справа – $1,27 \pm 0,38$ с; слева – $1,14 \pm 0,37$ с), чем в группе неудачного отлучения (справа – $0,97 \pm 0,43$ с; слева – $0,85 \pm 0,39$ с) ($p < 0,05$). Чувствительность, специфичность, положительная прогностическая ценность и отрицательная прогностическая ценность $\text{TRIA} > 0,8$ с для прогнозирования успеха

отлучения от ИВЛ составляла 92, 46, 89 и 56%, соответственно [1].

Индекс быстрого поверхностного дыхания (RSBI), рассчитываемый как отношение частоты дыхания к дыхательному объему (RR/VT), хорошо известный индекс отлучения от ИВЛ и один из наиболее часто используемых клинических показателей для прогнозирования исхода отлучения от ИВЛ [26]. S. Spadaro и др. предложили заменить дыхательный объем на смещение диафрагмы в RSBI. В исследование включили 51 пациента, которым требовалась ИВЛ в течение более 48 часов и которые были готовы выполнить пробу спонтанного дыхания. Большинство пациентов – 34 (66%) – были успешно отлучены от ИВЛ. Из 17 пациентов, у которых попытка отлучения не удалась, 11 (64%) пришлось повторно подключить к аппарату ИВЛ во время пробы спонтанного дыхания, троих (18%) повторно интубировать в течение 48 часов после экстубации, а троем (18%) требовалась неинвазивная вентиляционная поддержка в течение 48 часов после экстубации. Площади под ROC-кривыми для D-RSBI и RSBI составили 0,89 и 0,72, соответственно ($p = 0,006$) [27]. Расчет диафрагмального RSBI (DRSBI) привел к более точному прогностическому индексу, чем традиционный RSBI.

Частота встречаемости вентилятор-ассоциированной диафрагмальной дисфункции у пациентов, находящихся на аппаратах искусственной вентиляции легких, достигает 20% [28]. Умение вовремя диагностировать дисфункцию диафрагмы минимизирует риск развития дыхательной и сердечной недостаточности вследствие несвоевременного отлучения пациентов от аппаратов ИВЛ и экстубации.

В настоящее время существуют методы снижения риска развития дисфункции диафрагмы у пациентов, находящихся на аппаратах ИВЛ. К неинвазивным методам относятся чрескожная электростимуляция диафрагмы, чрескожная стимуляция спинного мозга. В группу инвазивных методов стимуляции диафрагмальной мышцы включены электрическая стимуляция диафрагмального нерва, стимуляция спинного мозга [29].

В настоящее время для отделений реанимации и интенсивной терапии наиболее актуален метод чрескожной электрической диафрагмальной стимуляции (ЧЭДС). ЧЭДС направлена на активацию и тренировку интактных мышечных волокон, вызывающих сокращение диафрагмы. Применение ЧЭДС предотвращает мышечную гипотрофию у пациентов с нервно-мышечными заболеваниями и у пациентов, зависимых от ИВЛ [30].

В 2021 г. проведено ретроспективное исследование, в котором анализировалась медицинская документация пациентов, находившихся в отделении реанимации вследствие травмы шейного отдела спинного мозга в период с января 2007 г. по декабрь 2016 г. [31]. Из 13 пациентов с трахеостомой 4 пациента получали 7-недельный курс ЧЭДС (30 Гц, 60 мА, длительность импульса 1 мс), 6 пациентов прошли по стандартному протоколу ИВЛ, остальные пациенты были ис-

ключены из анализа из-за неполноты данных или смерти. Электроды для ЧЭДС располагали билатерально по средней подмышечной линии между шестыми-седьмыми и седьмыми-восьмыми ребрами и над мечевидным отростком. Курс ЧЭДС приводил к увеличению силы инспираторных мышц, сокращению количества дней в реанимации, снижению потребности в ИВЛ. Отсутствие потребности в ИВЛ было ключевым по-

казателем, при котором завершался курс ЧЭДС; средняя продолжительность курса составила 47 сеансов. Все 4 пациента были сняты с ИВЛ.

Однако выборка пациентов в ретроспективном исследовании влияния ЧЭДС (n=4) достаточно мала, не доказана сохранность воздействия в ретроспективных исследованиях [32]. Этот факт – повод для проведения дальнейших исследований в существующем направлении.

Литература

1. Diaphragmatic parameters by ultrasonography for predicting weaning outcomes / P. Theerawit [et al.] // *BMC Pulm Med.* – 2018. – Vol. 18, iss. 1. – Art. 175. – doi: 10.1186/s12890-018-0739-9.
2. Chawla, J. Management of critical illness polyneuropathy and myopathy / J. Chawla, G. Gruener // *Neurol. Clin.* – 2010. – Vol. 28, iss. 4. – P. 961-977. – doi: 10.1016/j.ncl.2010.03.027.
3. Rose, L. Strategies for weaning from mechanical ventilation: A state of the art review / L. Rose // *Intensive Crit. Care Nurs.* – 2015. – Vol. 31, iss. 4. – P. 189-195. – doi: 10.1016/j.iccn.2015.07.003.
4. Rothaar, R. C. Extubation failure: magnitude of the problem, impact on outcomes, and prevention / R. C. Rothaar, S. K. Epstein // *Curr. Opin. Crit. Care.* – 2003. – Vol. 9, iss. 1. – P. 59-66. – doi: 10.1097/00075198-200302000-00011.
5. Светлицкая, О. И. Пути решения проблемы отлучения от искусственной вентиляции легких / О. И. Светлицкая, И. И. Канус // *Международные обзоры: клиническая практика и здоровье.* – 2020. – № 1. – С. 22-34. – edn: PGIYJU.
6. Weaning from mechanical ventilation / J. M. Boles [et al.] // *Eur. Respir. J.* – 2007. – Vol. 29, iss. 5. – P. 1033-1056. – doi: 10.1183/09031936.00010206.
7. Incidence and outcome of weaning from mechanical ventilation according to new categories / G. C. Funk [et al.] // *Eur. Respir. J.* – 2010. – Vol. 35, iss. 1. – P. 88-94. – doi: 10.1183/09031936.00056909.
8. Differences in clinical outcomes according to weaning classifications in medical intensive care units / B. H. Jeong [et al.] // *PLoS One.* – 2015. – Vol. 10, iss. 4. – Art. e0122810. – doi: 10.1371/journal.pone.0122810.
9. Rapid disuse atrophy of diaphragm fibers in mechanically ventilated humans / S. Levine [et al.] // *N. Engl. J. Med.* – 2008. – Vol. 358, iss. 13. – P. 1327-1335. – doi: 10.1056/NEJMoa070447.
10. Diaphragm function and weaning from mechanical ventilation: an ultrasound and phrenic nerve stimulation clinical study / M. Dres [et al.] // *Ann. Intensive Care.* – 2018. – Vol. 8, iss. 1. – Art. 53. – doi: 10.1186/s13613-018-0401-y.
11. Diaphragm dysfunction assessed by ultrasonography: influence on weaning from mechanical ventilation / W. Y. Kim [et al.] // *Crit. Care Med.* – 2011. – Vol. 39, iss. 12. – P. 2627-2630. – doi: 10.1097/CCM.0b013e3182266408.
12. ИВЛ-индуцированная дисфункция диафрагмы (обзор) / М. А. Бабаев [и др.] // *Общая реаниматология.* – 2018. – Т. 14, № 3. – С. 82-103. – doi: 10.15360/1813-9779-2018-3-82-103. – edn: USQGQL.
13. Неклюдова, Г. В. Возможности ультразвукового исследования диафрагмы / Г. В. Неклюдова, С. Н. Авдеев // *Терапевтический архив.* – 2019. – Т. 91, № 3. – С. 86-92. – doi: 10.26442/00403660.2019.03.0001. – edn: ZDFPCX.
14. Sonographic assessment of diaphragmatic thickening and excursion as predictors of weaning success in the intensive care unit: A prospective observational study / A. Kaur [et al.] // *Indian J. Anaesth.* – 2022. – Vol. 66, iss. 11. – P. 776-782. – doi: 10.4103/ija.ija_312_22.
15. A Review of the Ultrasound Assessment of Diaphragmatic Function in Clinical Practice / G. F. S. Papa [et al.] // *Respiration.* – 2016. – Vol. 91, iss. 5. – P. 403-411. – doi: 10.1159/000446518.
16. Ultrasound-assessed diaphragmatic impairment is a predictor of outcomes in patients with acute exacerbation of chronic obstructive pulmonary disease undergoing noninvasive ventilation / A. Marchion [et al.] // *Crit. Care.* – 2018. – Vol. 22, iss. 1. – Art. 109. – doi: 10.1186/s13054-018-2033-x.
17. Diaphragm ultrasonography to estimate the work of breathing during non-invasive ventilation / E. Vivier [et al.] // *Intensive Care Med.* – 2012. – Vol. 38, iss. 5. – P. 796-803. – doi: 10.1007/s00134-012-2547-7.
18. Diaphragm ultrasound as a predictor of successful extubation from mechanical ventilation / E. DiNino [et al.] // *Thorax.* – 2014. – Vol. 69, iss. 5. – P. 423-427. – doi: 10.1136/thoraxjnl-2013-204111.
19. Farghaly, S. Diaphragm ultrasound as a new method to predict extubation outcome in mechanically ventilated patients / S. Farghaly, A. A. Hasan // *Aust. Crit. Care.* – 2017. – Vol. 30, iss. 1. – P. 37-43. – doi: 10.1016/j.aucc.2016.03.004.
20. Ultrasonographic evaluation of liver/spleen movements and extubation outcome / J. R. Jiang [et al.] // *Chest.* – 2004. – Vol. 126, iss. 1. – P. 179-185. – doi: 10.1378/chest.126.1.179.
21. Сонографические показатели диафрагмы у здоровых лиц / В. С. Шабаев [и др.] // *Анестезиология и реаниматология.* – 2023. – № 2. – С. 44-50. – doi: 10.17116/anaesthesiology202302144.
22. The diaphragm / G. Ferrari [et al.] // *Thoracic Ultrasound* / eds: C. B. Laursen, N. M. Rahman, G. Volpicelli. – Sheffield : European Respiratory Society, 2018. – P. 129-147. – doi: 10.1183/2312508X.10006917.
23. Diaphragm ultrasound as indicator of respiratory effort in critically ill patients undergoing assisted mechanical ventilation: a pilot clinical study / M. Umbrello [et al.] // *Crit. Care.* – 2015. – Vol. 19, iss. 1. – Art. 161. – doi: 10.1186/s13054-015-0894-9.
24. Diaphragm ultrasound as a new index of discontinuation from mechanical ventilation / G. Ferrari [et al.] // *Crit. Ultrasound J.* – 2014. – Vol. 6, iss. 8. – Art. 8. – doi: 10.1186/2036-7902-6-8.
25. Sonographic evaluation of the diaphragm in critically ill patients. Technique and clinical applications / D. Matamis [et al.] // *Intensive Care Med.* – 2013. – Vol. 39, iss. 5. – P. 801-810. – doi: 10.1007/s00134-013-2823-1.
26. Diaphragmatic Rapid Shallow Breathing Index for Predicting Weaning Outcome from Mechanical Ventilation

- [Electronic resource]. – Mode of access: <https://ichgcp.net/clinical-trials-registry/NCT03561792>. – Date of access: 30.09.2023.
27. Can diaphragmatic ultrasonography performed during the T-tube trial predict weaning failure? The role of diaphragmatic rapid shallow breathing index / S. Spadaro [et al.] // *Crit. Care.* – 2016. – Vol. 20, iss. 1. – Art. 305. – doi: 10.1186/s13054-016-1479-y.
 28. Diaphragm Dysfunction in Mechanically Ventilated Patients / I. Dot [et al.] // *Arch. Bronconeumol.* – 2017. – Vol. 53, iss. 3. – P. 150-156. – doi: 10.1016/j.arbres.2016.07.008
 29. Шандыбина, Н. Д. Регуляция дыхания человека с помощью электрической стимуляции / Н. Д. Шандыбина, М. В. Куропатенко, Т. П. Мошонкина // *Российский физиологический журнал им. И. М. Сеченова.* – 2022. – Т. 108, № 11. – С. 1410-1425. – doi: 10.31857/S0869813922110115. – edn: RILRSX.
 30. Effects of transcutaneous electrical diaphragmatic stimulation on respiratory function in patients with prolonged mechanical ventilation / Y. F. Hsin [et al.] // *Ann. Thorac. Med.* – 2022. – Vol. 17, iss. 1. – P. 14-20. – doi: 10.4103/atm.atm_158_21.
 31. Transcutaneous electrical diaphragmatic stimulation reduces the duration of invasive mechanical ventilation in patients with cervical spinal cord injury: retrospective case series / G. L. Duarte [et al.] // *Spinal Cord Ser. Cases.* – 2021. – Vol. 7, iss. 1. – Art. 26. – doi: 10.1038/s41394-021-00396-4.
 32. Resistive inspiratory muscle training in people with spinal cord injury during inpatient rehabilitation: a randomized controlled trial / K. Postma [et al.] // *Phys. Ther.* – 2014. – Vol. 94, iss. 12. – P. 1709-1719. – doi: 10.2522/ptj.20140079.
- ### References
1. Theerawit P, Eksombatchai D, Sutherasan Y, Suwatanapongched T, Kiatboonsri C, Kiatboonsri S. Diaphragmatic parameters by ultrasonography for predicting weaning outcomes. *BMC Pulm Med.* 2018;18(1):175. doi: 10.1186/s12890-018-0739-9.
 2. Chawla J, Gruener G. Management of critical illness polyneuropathy and myopathy. *Neurol Clin.* 2010;28(4):961-977. doi: 10.1016/j.ncl.2010.03.027.
 3. Rose L. Strategies for weaning from mechanical ventilation: A state of the art review. *Intensive Crit Care Nurs.* 2015;31(4):189-195. doi: 10.1016/j.iccn.2015.07.003.
 4. Rothaar RC, Epstein SK. Extubation failure: magnitude of the problem, impact on outcomes, and prevention. *Curr Opin Crit Care.* 2003;9(1):59-66. doi: 10.1097/00075198-200302000-00011.
 5. Sviatlitskaya VI, Kanus II. Weaning from mechanical ventilation: the lines of approach. *Mezhdunarodnye obzory: klinicheskaja praktika i zdorove.* 2020;(1):22-34. edn: PGIYJU. (Russian).
 6. Boles JM, Bion J, Connors A, Herridge M, Marsh B, Melot C, Pearl R, Silverman H, Stanchina M, Vieillard-Baron A, Welte T. Weaning from mechanical ventilation. *Eur Respir J.* 2007;29(5):1033-1056. doi: 10.1183/09031936.00010206.
 7. Funk GC, Anders S, Breyer MK, Burghuber OC, Edelmann G, Heindl W, Hinterholzer G, Kohansal R, Schuster R, Schwarzmaier-D'Assie A, Valentin A, Hartl S. Incidence and outcome of weaning from mechanical ventilation according to new categories. *Eur Respir J.* 2010;35(1):88-94. doi: 10.1183/09031936.00056909.
 8. Jeong BH, Ko MG, Nam J, Yoo H, Chung CR, Suh GY, Jeon K. Differences in clinical outcomes according to weaning classifications in medical intensive care units. *PLoS One.* 2015;10(4):e0122810. doi: 10.1371/journal.pone.0122810.
 9. Levine S, Nguyen T, Taylor N, Friscia ME, Budak MT, Rothenberg P, Zhu J, Sachdeva R, Sonnad S, Kaiser LR, Rubinstein NA, Powers SK, Shrager JB. Rapid disuse atrophy of diaphragm fibers in mechanically ventilated humans. *N Engl J Med.* 2008;358(13):1327-1335. doi: 10.1056/NEJMoa070447.
 10. Dres M, Goligher EC, Dubé BP, Morawiec E, Dangers L, Reuter D, Mayaux J, Similowski T, Demoule A. Diaphragm function and weaning from mechanical ventilation: an ultrasound and phrenic nerve stimulation clinical study. *Ann Intensive Care.* 2018;8(1):53. doi: 10.1186/s13613-018-0401-y.
 11. Kim WY, Suh HJ, Hong SB, Koh Y, Lim CM. Diaphragm dysfunction assessed by ultrasonography: influence on weaning from mechanical ventilation. *Crit Care Med.* 2011;39(12):2627-2630. doi: 10.1097/CCM.0b013e3182266408.
 12. Babaev MA, Bykov DB, Birg TM, Vyzhigina MA, Eremenko AA. Ventilator-Induced Diaphragm Dysfunction (Review). *General Reanimatology.* 2018;14(3):82-103. doi: 10.15360/1813-9779-2018-3-82-103. edn: USQQL. (Russian).
 13. Nekludova GV, Avdeev SN. Possibilities of ultrasound research of the diaphragm. *Therapeutic Archive.* 2019;91(3):86-92. doi: 10.26442/00403660.2019.03.000129. edn: ZDFPCX. (Russian).
 14. Kaur A, Sharma S, Singh VP, Krishna MR, Gautam PL, Singh G. Sonographic assessment of diaphragmatic thickening and excursion as predictors of weaning success in the intensive care unit: A prospective observational study. *Indian J Anaesth.* 2022;66(11):776-782. doi: 10.4103/ija.ija_312_22.
 15. Papa GFS, Pellegrino GM, Marco FD, Imeri G, Brochard L, Goligher E, Centanni S. A Review of the Ultrasound Assessment of Diaphragmatic Function in Clinical Practice. *Respiration.* 2016;91(5):403-411. doi: 10.1159/000446518.
 16. Marchioni A, Castaniere I, Tonelli R, Fantini R, Fontana M, Tabbi L, Viani A, Giaroni F, Ruggieri V, Cerri S, Clini E. Ultrasound-assessed diaphragmatic impairment is a predictor of outcomes in patients with acute exacerbation of chronic obstructive pulmonary disease undergoing noninvasive ventilation. *Crit Care.* 2018;22(1):109. doi: 10.1186/s13054-018-2033-x.
 17. Vivier E, Mekontso Dessap A, Dimassi S, Vargas F, Lyazidi A, Thille AW, Brochard L. Diaphragm ultrasonography to estimate the work of breathing during non-invasive ventilation. *Intensive Care Med.* 2012;38(5):796-803. doi: 10.1007/s00134-012-2547-7.
 18. DiNino E, Gartman EJ, Sethi JM, McCool FD. Diaphragm ultrasound as a predictor of successful extubation from mechanical ventilation. *Thorax.* 2014;69(5):423-427. doi: 10.1136/thoraxjnl-2013-204111.
 19. Farghaly S, Hasan AA. Diaphragm ultrasound as a new method to predict extubation outcome in mechanically ventilated patients. *Aust Crit Care.* 2017;30(1):37-43. doi: 10.1016/j.aucc.2016.03.004.
 20. Jiang JR, Tsai TH, Jerng JS, Yu CJ, Wu HD, Yang PC. Ultrasonographic evaluation of liver/spleen movements and extubation outcome. *Chest.* 2004;126(1):179-185. doi: 10.1378/chest.126.1.179.

21. Shabaev VS, Orazmagomedova IV, Mazurok VA, Berezina AV, Vasilyeva LG, Aleksandrova DA. Sonography indicators of diaphragm in healthy individuals. *Russian Journal of Anesthesiology and Reanimatology*. 2023;(2):44-50. doi: 10.17116/anaesthesiology202302144. (Russian).
22. Ferrari G, Skaarup SH, Panero F, Wrightson JM. The diaphragm. In: Laursen CB, Rahman NM, Volpicelli G, eds. *Thoracic Ultrasound*. Sheffield: European Respiratory Society; 2018. p. 129-147. doi: 10.1183/2312508X.10006917.
23. Umbrello M, Formenti P, Longhi D, Galimberti A, Piva I, Pezzi A, Mistraletti G, Marini JJ, Iapichino G. Diaphragm ultrasound as indicator of respiratory effort in critically ill patients undergoing assisted mechanical ventilation: a pilot clinical study. *Crit Care*. 2015;19(1):161. doi: 10.1186/s13054-015-0894-9.
24. Ferrari G, De Filippi G, Elia F, Panero F, Volpicelli G, Aprà F. Diaphragm ultrasound as a new index of discontinuation from mechanical ventilation. *Crit Ultrasound J*. 2014;6(1):8. doi: 10.1186/2036-7902-6-8.
25. Matamis D, Soilemezi E, Tsagourias M, Akoumianaki E, Dimassi S, Boroli F, Richard JC, Brochard L. Sonographic evaluation of the diaphragm in critically ill patients. Technique and clinical applications. *Intensive Care Med*. 2013;39(5):801-810. doi: 10.1007/s00134-013-2823-1.
26. Diaphragmatic Rapid Shallow Breathing Index for Predicting Weaning Outcome from Mechanical Ventilation [Internet]. Available from: <https://ichgcp.net/clinical-trials-registry/NCT03561792>
27. Spadaro S, Grasso S, Mauri T, Dalla Corte F, Alvisi V, Ragazzi R, Cricca V, Biondi G, Di Mussi R, Marangoni E, Volta CA. Can diaphragmatic ultrasonography performed during the T-tube trial predict weaning failure? The role of diaphragmatic rapid shallow breathing index. *Crit Care*. 2016;20(1):305. doi: 10.1186/s13054-016-1479-y.
28. Dot I, Pérez-Teran P, Samper MA, Masclans JR. Diaphragm Dysfunction in Mechanically Ventilated Patients. *Arch Bronconeumol*. 2017;53(3):150-156. doi: 10.1016/j.arbres.2016.07.008. (English, Spanish.)
29. Shandybina ND, Kuropatenko MV, Moshonkina TR. Regulation of human respiration by electrical stimulation. *Russian journal of physiology*. 2022;108(11):1410-1425. doi: 10.31857/S0869813922110115. edn: RILRSX. (Russian).
30. Hsin YF, Chen SH, Yu TJ, Huang CC, Chen YH. Effects of transcutaneous electrical diaphragmatic stimulation on respiratory function in patients with prolonged mechanical ventilation. *Ann Thorac Med*. 2022;17(1):14-20. doi: 10.4103/atm.atm_158_21.
31. Duarte GL, Bethiol AL, Ratti LDSR, Franco G, Moreno R, Tonella RM, Falcão ALE. Transcutaneous electrical diaphragmatic stimulation reduces the duration of invasive mechanical ventilation in patients with cervical spinal cord injury: retrospective case series. *Spinal Cord Ser Cases*. 2021;7(1):26. doi: 10.1038/s41394-021-00396-4.
32. Postma K, Haisma JA, Hopman MT, Bergen MP, Stam HJ, Bussmann JB. Resistive inspiratory muscle training in people with spinal cord injury during inpatient rehabilitation: a randomized controlled trial. *Phys Ther*. 2014;94(12):1709-1719. doi: 10.2522/ptj.20140079.

ULTRASOUND EXAMINATION OF THE DIAPHRAGM AS A PREDICTOR OF SUCCESSFUL VENTILATOR WEANING OF PATIENTS

K. A. Sinitsa, R. E. Yakubtsevich

Grodno State Medical University, Grodno, Belarus

The relevance of the survey is linked with the persistent problem of weaning patients who have been on mechanical ventilation for a long time.

The objective. To conduct a literature analysis in order to summarize the results of modern researches devoted to the study of sonographic parameters that allow estimation of diaphragmatic functions for predicting successful weaning of patients from artificial lung ventilation.

Material and methods. In total 33 Russian-language and English-language sources were analyzed.

Results. The following ultrasound parameters of the diaphragm were analyzed in detail: diaphragm excursion, diaphragm thickening fraction, diaphragmatic rapid shallow breathing index, and the time to peak inspiratory amplitude of the diaphragm.

Conclusions. The ability to timely diagnose diaphragm dysfunction using ultrasound minimizes the risk of respiratory and cardiac failure. Currently there are methods of the diaphragm muscle stimulation to improve the recovery of lost functions.

Keywords: diaphragm, sonographic study, diaphragm thickening fraction, diaphragmatic rapid shallow breathing index, time to peak inspiratory amplitude of the diaphragm, percutaneous electrical stimulation of the diaphragm.

For citation: Sinitsa KA, Yakubtsevich RE. Ultrasound examination of the diaphragm as a predictor of successful ventilator weaning of patients. *Journal of the Grodno State Medical University*. 2024;22(1):13-18. <https://doi.org/10.25298/2221-8785-2024-22-1-13-18>.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Об авторах / About the authors

*Синица Екатерина Андреевна / Sinitsa Katsiaryna, e-mail: katerina.sinitsa0507@mail.ru

Якубцевич Руслан Эдвардович / Yakubtsevich Ruslan, ORCID: 0000-0002-8699-8216

* – автор, ответственный за переписку / corresponding author

Поступила / Received: 01.11.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 23.01.2024