

Возможности ультразвукового исследования диафрагмы

Г.В. Неклюдова^{1,2}, С.Н. Авдеев^{1,2}

¹ФГБУ «Научно-исследовательский институт пульмонологии» ФМБА России, Москва, Россия;

²ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова» Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, Россия

Аннотация

Ультразвуковой метод является неинвазивным и безопасным методом диагностики. Ультразвуковое исследование (УЗИ) диафрагмы позволяет провести прямое исследование ее структуры и функции. Используя стационарные и портативные УЗ-сканеры, исследование диафрагмы может быть осуществлено в специализированных лабораториях, в амбулаторных отделениях, в различных отделениях клиники, в том числе и в отделениях интенсивной терапии, у больных, находившихся в разных клинических состояниях. УЗИ диафрагмы может быть реализовано на приборах разных технических уровней. Несмотря на то, что в настоящее время метод УЗИ диафрагмы не стандартизован, тем не менее, он позволяет получить клинически важную информацию для решения различных клинических исследований, в том числе и при проведении динамического наблюдения.

Ключевые слова: диафрагма, ультразвуковое исследование, болезни органов дыхания.

Для цитирования: Неклюдова Г.В., Авдеев С.Н. Возможности ультразвукового исследования диафрагмы. *Терапевтический архив.* 2019; 91 (3): 86–92. DOI: 10.26442/00403660.2019.03.000129

Possibilities of ultrasound research of the diaphragm

G.V. Nekludova^{1,2}, S.N. Avdeev^{1,2}

¹Pulmonology Scientific Research Institute under Federal Medical and Biological Agency of Russian Federation, Moscow, Russia;

²I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), Moscow, Russia

The ultrasound method is a non-invasive and safe diagnostic method. Ultrasound examination (ultrasound) of the diaphragm allows you to conduct a direct study of its structure and function. Using stationary and portable ultrasound scanners, the study of the diaphragm can be carried out in specialized laboratories, in outpatient departments, in various departments of the clinic, including in intensive care units, in patients in different clinical conditions. Ultrasound of the diaphragm can be implemented on devices of different technical levels. Despite the fact that at present the diaphragm ultrasound method is not standardized, nevertheless, it provides clinically important information for solving various clinical studies, including when conducting dynamic observation.

Keywords: diaphragm, ultrasonography, respiratory diseases.

For citation: Nekludova G.V., Avdeev S.N. Possibilities of ultrasound research of the diaphragm. *Therapeutic Archive.* 2019; 91 (3): 86–92. DOI: 10.26442/00403660.2019.03.000129

НВЛ – неинвазивная вентиляция легких
ОДН – острая дыхательная недостаточность

УЗИ – ультразвуковое исследование
ХОБЛ – хроническая обструктивная болезнь легких

Диафрагма является одной из основных инспираторных дыхательных мышц и играет ведущую роль при вентиляции легких. Вклад диафрагмы в обеспечение вдоха у здорового человека составляет примерно 70% [1]. Информация о морфофункциональном состоянии диафрагмы важна для врачей разных специальностей (пульмонологи, врачи экстренной медицины, неврологи, радиологи, хирурги и т.д.). Нарушение функции и/или структуры диафрагмы может наблюдаться при неврологических, нейромышечных и мышечных патологиях.

В пульмонологии особый интерес к состоянию диафрагмы возникает при верификации причин дыхательной недостаточности. Изменение функции и/или структуры возможно на фоне инвазивной вентиляции легких, при приеме глюкокортикостероидов, при гиперинфляции легких, при опухоли легкого, при рестриктивной паренхиматозной патологии легких, при миозитах на фоне воспаления различного генеза и метаболических нарушениях, при наличии жидкости в плевральных полостях, при инвазии опухоли и т.д. [2].

До настоящего времени в основном использовались либо инвазивные методы исследования, либо методы лучевой диагностики. Однако применение традиционных методов

исследования диафрагмы имеет ряд ограничений, особенно если речь идет о динамическом наблюдении, об исследовании пациентов, находившихся в критическом состоянии.

В настоящее время все чаще при исследовании состояния диафрагмы в диагностическом алгоритме на передний план выходит ультразвуковой метод исследования, поскольку он является неинвазивным и безопасным методом диагностики, позволяющим получить важную информацию как о структуре, так и о функции диафрагмы [3, 4]. Данная методика является простой, хорошо воспроизводимой и может быть использована как при динамическом наблюдении, так и при исследовании больных, находившихся в критическом состоянии, что называется «у постели больного».

Диафрагма – куполообразная скелетная поперечно-полосатая мышца, которая разделяет грудную и брюшную полости [5, 6]. При сокращении диафрагма движется в каудальном направлении, в результате чего увеличивается внутригрудной объем и снижается внутригрудное давление. Это приводит к возникновению дыхательного потока из атмосферы в легочные альвеолы. Межреберные и грудные мышцы также участвуют в дыхании, но при спокойном дыхании они вносят существенно меньший вклад по сравнению с диафрагмой. При расслаблении диафрагмы происхо-

дит выдох. Благодаря упругой отдаче легких и грудной клетки диафрагма пассивно движется в краниальном направлении. При форсированном маневре быстрый выдыхаемый поток образуется при расслаблении диафрагмы и сокращении внутренних межреберных и абдоминальных мышц [7]. Оценка функции диафрагмы основана на определении экскурсии и утолщения диафрагмы при дыхании.

Оценка экскурсии диафрагмы

Анализ экскурсии диафрагмы может быть проведен как в М-режиме, так и в В-режиме ультразвукового исследования (УЗИ; **рис. 1**). В настоящее время нет единого мнения о методике проведения исследования. Некоторые специалисты проводят исследование пациента в положении лежа на спине, другие – стоя или сидя, а третьи – в положении полулежа [3].

Для исследования экскурсии диафрагмы используют низкочастотный УЗ-датчик (2,5–5 МГц) [3]. При исследовании в М-режиме датчик располагают между среднеключичной и переднеаксиллярной линиями, при этом луч сканирования должен быть ориентирован медиально в дорсо-краниальном направлении, а курсор УЗ-луча должен быть расположен параллельно направлению движения диафрагмы (т.е. УЗ-луч пересекает диафрагму под прямым углом). При таком способе сканирования проводится анализ движения задней трети диафрагмы, которая в норме характеризуется максимальной экскурсией. При исследовании правого купола диафрагмы печень служит акустическим окном, а движение диафрагмы определяется в виде перемещения гиперэхогенной линии, которая примыкает к печени (**см. рис. 1**). При исследовании левого купола диафрагмы в качестве ультразвукового окна используют изображение селезенки. Однако исследование диафрагмы слева затруднено из-за недостаточного акустического окна и газа, содержащегося в желудке и кишечнике.

В этом случае датчик располагают под ребрами, между переднеаксиллярной и среднеаксиллярной линиями. Следует обратить внимание на то, что движение брюшной стенки может смещать датчик, приводя к ошибке в оценке экскурсии диафрагмы. Поэтому важно во время проведения исследования стабилизировать расположение и наклон датчика. Кроме того, расположение и подвижность диафрагмы находятся в зависимости от состояния органов брюшной полости, таким образом, важно, чтобы специалист, проводящий исследование функции диафрагмы, обладал навыками и опытом проведения УЗИ органов брюшной полости [3].

При оценке дыхательной экскурсии диафрагмы в краниокаудальном направлении в В-режиме низкочастотный датчик располагают перпендикулярно последнему межреберному промежутку, между среднеаксиллярной и заднеаксиллярной линиями, а изображение печени и селезенки используется в качестве акустического окна. Некоторые исследователи вместо анализа движения правого купола диафрагмы предлагают использовать оценку движения портальной вены в краниокаудальном направлении [8].

Проводя аналогию с эхокардиографией, для анализа движения диафрагмы может быть использована оценка скорости движения диафрагмы и методика *speckle tracking* [9–12]. Однако в настоящее время имеется недостаточно

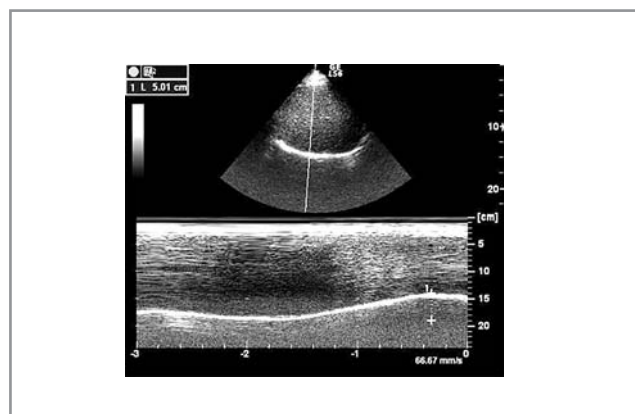


Рис. 1. Исследование экскурсии диафрагмы в М-режиме при глубоком вдохе, на уровне общей емкости легких (из личного архива Неклюдовой Г.В.).

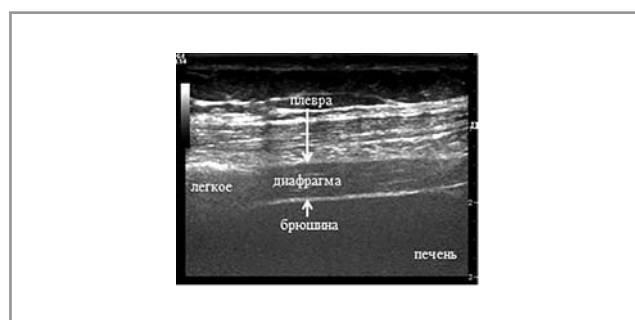


Рис. 2. Изображение диафрагмы в В-режиме (из личного архива Неклюдовой Г.В.).

данных об использовании новых УЗ-технологий для исследования диафрагмы, чтобы обосновать достоверность их применения и определить диапазон нормальных значений.

Оценка утолщения диафрагмы

При сокращении диафрагмы увеличивается ее толщина. Для оценки толщины диафрагмы используется высокочастотный датчик (7–15 МГц), с помощью которого визуализируют диафрагму в месте ее соприкосновения с латеральной грудной стенкой (зона аппозиции) [13]. Оценка зоны аппозиции проводится на протяжении 0,5–2 см ниже костно-диафрагмального синуса. Нижняя граница костно-диафрагмального синуса определяется в конце вдоха как участок перехода УЗ-артефакта от изображения легочной ткани в изображение диафрагмы и печени/селезенки [14]. Датчик располагают в последнем межреберном промежутке по переднеаксиллярной линии, и его поворачивают таким образом, чтобы изображение диафрагмы имело наибольшую четкость [13]. Некоторые исследователи предлагают датчик располагать в 8–9-м межреберном промежутке, между передней и средней аксиллярной линиями либо между средней и задней аксиллярной линиями [3, 15]. При глубоком вдохе движение легких может препятствовать визуализации диафрагмы, в этом случае датчик следует сместить ниже.

Диафрагма визуализируется в виде гипоехогенной структуры выше изображения печени или селезенки, ограниченная двумя тонкими гиперэхогенными линиями,

Сведения об авторах:

Авдеев Сергей Николаевич – член-корр. РАН, д.м.н., проф., зав. каф. пульмонологии ФГАОУ ВО «Первый МГМУ им. И.М. Сеченова» Минздрава России, зав. клиническим отд. ФГБУ «НИИ пульмонологии» ФМБА России; ORCID: 0000-0002-5999-2150

Контактная информация:

Неклюдова Галина Васильевна – д.м.н., в.н.с., доцент; e-mail: Nekludova_gala@mail.ru; ORCID: 0000-0002-9509-0867

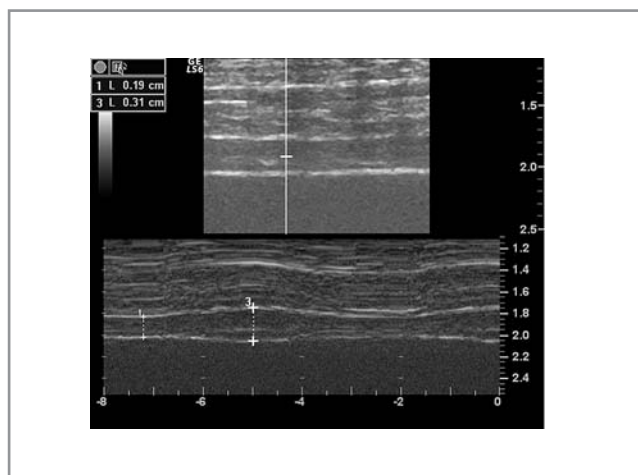


Рис. 3. Измерение толщины диафрагмы в М-режиме: 1 – в конце выдоха, на уровне функциональной остаточной емкости легких; 2 – в конце вдоха (из личного архива Неклюдовой Г.В.).

соответствующими диафрагмальной плевре (верхняя линия) и брюшине (нижняя линия) [13] (рис. 2).

Для того чтобы измерение толщины было выполнено наиболее точно, необходимо, чтобы УЗ-луч проходил перпендикулярно, а не косо к поверхности диафрагмы.

Утолщение диафрагмы при дыхании может быть измерено в М- и В-режиме (рис. 3, 4). Исследование проводят как при спокойном дыхании, так и при дыхательных маневрах (глубокий вдох и *sniff*-маневр). 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*) [13]. В М-режиме толщину диафрагмы измеряют от середины плевральной линии до середины перитонеальной линии [3]. Чтобы минимизировать ошибку, следует выполнить не менее 3 измерений каждого параметра. Одни исследователи для анализа используют среднюю величину, другие – наибольшую величину из выполненных

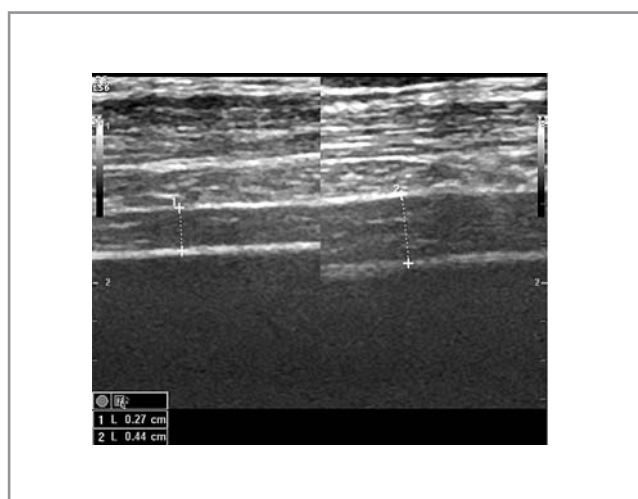


Рис. 4. Измерение толщины диафрагмы в В-режиме: слева – изображение диафрагмы при спокойном выдохе, на уровне функциональной остаточной емкости легких; справа – изображение диафрагмы при глубоком вдохе, на уровне общей емкости легких (из личного архива Неклюдовой Г.В.).

измерений. По проведенным измерениям могут быть рассчитаны следующие параметры [13–16]:

- 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) = $(tdiVt - tdiFRC) / tdiFRC$.

Несмотря на то что нет единого мнения о методике проведения УЗИ диафрагмы, тем не менее, определены нормальные значения экскурсии, толщины и фракции утолщения диафрагмы [13, 17, 18]. Показано, что повторные измерения параметров диафрагмы при УЗИ проводятся с достаточно низкой вариабельностью как одним исследователем, так и разными исследователями [13].

При анализе экскурсии диафрагмы выявлена ее связь с легочными объемами, измеренными при спирометрии, кроме того, экскурсия диафрагмы коррелирует с полом и массой тела [13, 19–22].

В исследовании А. Boussuges и соавт. у здоровых лиц экскурсия диафрагмы составила при спокойном дыхании у мужчин 18 ± 3 мм, у женщин 16 ± 3 мм, при *sniff*-маневре у мужчин 29 ± 6 мм, у женщин 26 ± 5 мм, при глубоком вдохе у мужчин 70 ± 11 мм, у женщин 57 ± 10 мм [23]. Предлагаемый диапазон нормальных значений экскурсии диафрагмы представлен в таблице.

При сравнении результатов УЗИ диафрагмы и рентгенографии грудной клетки не было получено четкого соответствия [24]. Так, в ряде случаев при УЗИ диафрагмы выявлена ее недостаточная экскурсия, в то время как при рентгенографии диафрагма имела нормальное расположение и, наоборот, высокое расположение диафрагмы не всегда сопровождалось снижением экскурсии диафрагмы при УЗИ. Эти результаты соответствуют нашему собственному опыту исследования экскурсии диафрагмы.

Исследования толщины диафрагмы свидетельствуют о том, что имеется тесная корреляционная связь между толщиной диафрагмы, измеренной при УЗИ и определенной при аутопсии [25]. R. Carrillo-Esper и соавт. провели оценку толщины диафрагмы в конце спокойного выдоха у 109 здоровых лиц [26]. По результатам данного исследования толщина диафрагмы составила у мужчин $1,9 \pm 0,4$ мм, у женщин $1,4 \pm 0,3$ мм, т.е. нормальное значение толщины диафрагмы на уровне функциональной остаточной емкости легких должно превышать 1,3–1,5 мм для женщин и 1,7–2,0 мм для мужчин ($>1,5$ –1,7 мм для общей когорты). А.Г. Воон и соавт. в своем исследовании также определяли нижнюю границу нормального значения этого показателя (как 5% процентиля), которая составила 1,5 мм [17].

Не выявлено связи между толщиной диафрагмы и индексом массы тела или окружностью грудной клетки, в то время как определялась корреляция между утолщением диафрагмы и легочными объемами, измеренными при спирометрии [13, 17, 26, 27]. В норме при максимально глубоком вдохе толщина диафрагмы должна увеличиваться не менее чем на 20% от толщины диафрагмы на выдохе, причем разница между измерениями, выполненными справа и слева, должна быть минимальной [17].

Итак, представленный алгоритм исследования свидетельствует о том, что данный метод при соблюдении правил проведения исследования позволяет достаточно просто получить точную и важную клиническую информацию. Основные аспекты применения УЗИ диафрагмы представлены ниже.

Диапазон нормальных значений амплитуды движения диафрагмы (в см; исследование в М-режиме; данные представлены как 5–95 % процентиль) [13, 23]

Режим исследования	Справа (n=195)		Слева (n=45)	
	мужчины	женщины	мужчины	женщины
Спокойное дыхание	1,1–2,5	1,0–2,2	1,0–2,6	0,9–2,4
<i>Sniff</i> -маневр	1,8–4,4	1,6–3,6	1,9–4,3	1,7–3,7
Глубокое дыхание	4,7–9,2	3,6–7,7	5,6–9,3	4,3–8,4

Диафрагма и механическая вентиляция легких

Механическая вентиляция легких является жизненно-храняющей процедурой. Однако при длительном ее применении возможно развитие серьезных осложнений [13]. Поскольку механическая вентиляция разгружает дыхательные мышцы, то длительное ее применение может способствовать атрофии диафрагмы и ее сократительной дисфункции [28, 29]. Окислительный стресс и повышение протеолитической активности также вносят вклад в формирование дисфункции диафрагмы [29–31]. В исследовании С. Sassoop и соавт., выполненном на животных, представлено, что при контролируемой механической вентиляции легких наблюдается повреждение миофибрилл диафрагмы [32]. Результаты проведенных исследований показали, что об атрофии диафрагмы свидетельствует уменьшение ее толщины, наблюдаемое со временем при проведении механической вентиляции легких, причем изменение толщины диафрагмы происходит достаточно рано и определяется интенсивностью респираторной поддержки, степень атрофии может быть связана с длительностью механической вентиляции [13, 33]. Таким образом, при механической вентиляции легких атрофия диафрагмы – это быстро развивающийся патологический процесс с экспоненциальным уменьшением ее толщины [34]. Результаты исследований свидетельствуют о том, что выявление дисфункции диафрагмы до того, как будет проведена экстубация трахеи, позволит снизить риск неудачного отлучения от механической вентиляции [35–37]. J. Jiang и соавт. определили пороговое значение амплитуды движения диафрагмы, при котором наилучшим образом удается предсказать успех при отлучении больного от механической вентиляции [36]. 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%, а точность – 84%, причем данный параметр лучше предсказывает успех при экстубации трахеи, нежели традиционные показатели. В исследовании S. Farghaly и A. Hasan пороговое значение этого показателя составило 10,5 мм, при котором чувствительность и специфичность были равны 87 и 71% соответственно [37].

Однако экскурсия диафрагмы при механической вентиляции обусловлена сокращением самой диафрагмы и ее пассивным смещением в результате механической вентиляции. Для того чтобы экскурсия диафрагмы была оценена адекватно, измерения необходимо проводить 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 [13].

По мнению М. Umbrello и соавт., в отличие от экскурсии диафрагмы ее толщина и утолщение при дыхании точнее отражают сократительную способность диафрагмы при вспомогательной механической вентиляции легких [38]. Е. DiNino и соавт. провели анализ фракции утолщения диафрагмы для оценки предполагаемого успеха экстубации трахеи.

При пороговом значении этого показателя равном 30% положительный прогноз при экстубации трахеи вероятен с чувствительностью и специфичностью равными 88 и 71% соответственно [16]. При увеличении порогового значения фракции утолщения диафрагмы более 36% чувствительность и специфичность равны соответственно 82 и 88% [39].

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

Оценка респираторного усилия

В настоящее время появились исследования, посвященные анализу роли УЗИ диафрагмы для оценки работы дыхания. В этих исследованиях проведен сравнительный анализ параметров, получаемых при исследовании диафрагмы с помощью УЗИ и традиционных параметров, характеризующих работу дыхания [трансдиафрагмальное давление при произвольном дыхании и при электрической либо магнитной стимуляции диафрагмального нерва, максимальное инспираторное давление в ротовой полости (MIP), давление в полости носа во время *sniff*-теста (SNIP) [40–45]]. Имеющий опыт исследования функции диафрагмы свидетельствует о том, что среди УЗ-параметров именно фракция утолщения диафрагмы лучшим образом отражает респираторное усилие, причем выявлена значимая корреляционная связь этого показателя с параметрами традиционных методов исследования работы дыхания. Так, в исследовании А. Marchioni и соавт. у больных с обострением хронической обструктивной болезни легких (ХОБЛ) выявлена сильная достоверная корреляция ($r=0,81$; $p=0,004$) между фракцией утолщения диафрагмы при спонтанном дыхании и трансдиафрагмальным давлением, измеренным при *sniff*-маневре [15].

Диагностика паралича диафрагмы

Если при рентгенографии органов грудной клетки выявлено высокое стояние диафрагмы, то необходимо провести дополнительные исследования, чтобы подтвердить паралич диафрагмы. Традиционно с этой целью используют флуороскопическое исследование диафрагмы при спокойном дыхании, при *sniff*-маневре и при глубоком вдохе [13]. Однако данная методика обладает недостаточной специфичностью, реализована на громоздком оборудовании и имеет лучевую нагрузку [2]. Измерение трансдиафрагмального давления, исследование проводимости диафрагмального нерва, игольчатая электромиография диафрагмы и динамическое МРТ-исследование также используются для диагностики пареза диафрагмы [13]. В свою очередь УЗИ диафрагмы является неинвазивным методом и позволяет получить результаты, сходные с данными флуороскопии [22, 23]. При этом данная методика лишена лучевой нагрузки, может быть применена многократно для динамического наблюдения и, учитывая возможность использования портативного оборудования, может быть применена «у постели больного», что особенно важно в отделениях интенсивной терапии.

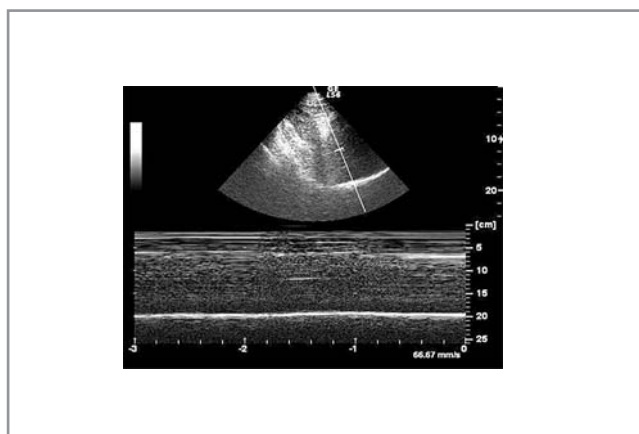


Рис. 5. Парез правого купола диафрагмы, исследование в В- и М-режимах при глубоком вдохе (из личного архива Неклюдовой Г.В.).

Для диагностики пареза диафрагмы с помощью УЗИ должны быть оценены дыхательная экскурсия диафрагмы и ее толщина. УЗ-признаками пареза диафрагмы являются высокое расположение купола/куполов диафрагмы, снижение амплитуды движения, отсутствие движения или парадоксальное движение диафрагмы при спокойном дыхании и парадоксальное движение диафрагмы при нагрузке (например, при *sniff*-маневре) [46] (рис. 5).

Нижняя граница диапазона нормальных значений амплитуды движения диафрагмы представлена в таблице. Снижение экскурсии диафрагмы при максимальном усилии на вдохе менее 25 мм со 100% чувствительностью и 85% специфичностью свидетельствует о тяжелой дисфункции диафрагмы [47].

При парезе диафрагмы помимо нарушения ее подвижности будет отмечаться уменьшение толщины диафрагмы и недостаточное ее утолщение при вдохе [13]. По данным E. Gottesman и F.D. McCool, парез диафрагмы вероятен, когда *tdiFRC* < 2 мм [48]. Однако надо помнить, что на толщину диафрагмы влияют пол, масса тела, рост и нутритивный статус пациента, поэтому более надежным является параметр фракции утолщения диафрагмы [13, 49, 50]. В проведенных исследованиях показано, что при парезе диафрагмы величина *Dtf* будет < 0,2, т.е. при глубоком вдохе от уровня FRC до TLC толщина диафрагмы увеличивается менее 20% [17, 48]. Если использовать комбинацию двух УЗ-признаков, а именно *Dtf* < 0,2 и *tdiFRC* < 1,4 мм, то при диагностике нейромышечного пареза диафрагмы чувствительность и специфичность составляют 93 и 100% соответственно [51].

УЗИ диафрагмы при ХОБЛ

В разных исследованиях сообщается как о нормальной, так и о сниженной функции диафрагмы при ХОБЛ [52–58]. В исследовании A. Marchioni и соавт. дисфункция диафрагмы определена у 32% больных с тяжелым обострением ХОБЛ [15]. M.R. Vagía и соавт. не выявили достоверных отличий в толщине диафрагмы у здоровых лиц и у больных ХОБЛ за исключением группы больных с гиперинфляцией и выраженными воздушными «ловушками» [59]. В некоторых исследованиях показано, что снижение экскурсии диафрагмы также частично связано с гиперинфляцией легких [60, 61]. Дисфункция диафрагмы при ХОБЛ и других obstructивных заболеваниях легких, сопровождавшихся гиперинфляцией, обусловлена тем, что длина волокон диафрагмы укорачивается [58], при этом геометрия диафрагмы меняется – она уплощается, радиус кривизны диафрагмы

снижается, а область, которой диафрагма прилегает к внутренней поверхности грудной клетки (зона аппозиции), уменьшается или даже практически исчезает [62–65]. Помимо механических и функциональных причин формирования дисфункции диафрагмы при ХОБЛ можно также выделить воспаление и апоптоз, образование активных форм кислорода с последующим запуском протеолитических каскадов и усилением оксидативного стресса [58, 66].

В настоящее время нет единого мнения о влиянии терапии стероидами при респираторной патологии на дисфункцию диафрагмы.

Таким образом, остается много нерешенных вопросов при исследовании больных с патологией органов дыхания.

УЗИ диафрагмы при острой дыхательной недостаточности

Существует множество патологических причин, которые сопровождаются повышенной нагрузкой на дыхательные мышцы в результате глубокого и частого дыхания, что ведет к утомлению и истощению дыхательной мускулатуры, в том числе и мускулатуры диафрагмы [13]. Истощение дыхательной мускулатуры приводит к развитию острой дыхательной недостаточности (ОДН), возникает необходимость во вспомогательной вентиляции легких. Одной из частых причин развития ОДН является обострение ХОБЛ [67].

В настоящее время имеется недостаточно данных об использовании УЗИ диафрагмы при ОДН, однако результаты проведенных исследований демонстрируют несомненную важность этого метода. Так, X. Bobbia и соавт. показали, что у больных с экскурсией диафрагмы > 2,3 см, измеренной в М-режиме, не требовалась неинвазивная вентиляция легких (НВЛ), в то время как при экскурсии < 2 см потребность в НВЛ значимо возрастала [68]. Результаты исследования F. Antenora и соавт. свидетельствуют о том, что 1/3 пациентов, которым требовалась НВЛ, имели фракцию утолщения диафрагмы < 0,2 [69]. Исследование A. Marchioni и соавт. показало, что у больных с обострением ХОБЛ при наличии дисфункции диафрагмы более чем в 4 раза возрастает риск неудачной НВЛ, а такой УЗ-параметр дисфункции диафрагмы, как фракция утолщения диафрагмы, продемонстрировал большую точность в предсказании неблагоприятного результата НВЛ при ОДН, чем исходные значения $pH < 7,25$ или изменения pH и парциального напряжения CO_2 в артериальной крови в первые 2 ч после начала НВЛ, с помощью которых традиционно оценивают эффективность НВЛ [15]. Признаки дисфункции диафрагмы коррелируют с вероятностью летального исхода, длительностью пребывания в отделении интенсивной терапии, необходимостью проведения длительной механической вентиляции легких.

Заключение

Таким образом, подводя итог, следует сказать, что УЗ-метод оценки функции диафрагмы является перспективным. Безопасность и информативность метода позволяют широко использовать данный метод, в том числе и при динамическом наблюдении. Особенно актуальным исследование диафрагмы может быть при обследовании больных с выраженной одышкой. Он дает возможность принять правильное решение при ведении больных, находящихся на вспомогательной вентиляции легких. Однако небольшой объем имеющихся данных требует проведения дальнейших исследований.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Mead J, Loring SH. Analysis of volume displacement and length changes of the diaphragm during breathing. *J Appl Physiol*. 1982;53:750-5. doi: /10.1152/jappl.1982.53.3.750
- Laghi F, Tobin MJ. Disorders of the respiratory muscles. *Am J Respir Crit Care Med*. 2003;168:10-48. doi:10.1164/rccm.2206020
- Papa GFS, Pellegrino GM, Di Marco F, Imeri G, Brochard L, Goligher E, et al. A Review of the Ultrasound Assessment of Diaphragmatic Function in Clinical Practice. *Respiration*. 2016;91:403-11. doi: 10.1159/000446518
- Перлей В.Е., Гичкин А.Ю., Каменева М.Ю., Александров А.Л. Функциональное состояние диафрагмы у больных хронической обструктивной болезнью легких. *Вестник Тверского государственного университета*. 2013;29:211-9 [Perley VE, Gichkin AYU, Kameneva MYu, Aleksandrov AL. Functional condition of the diaphragm in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Vestn Tversk gos un-ta*. 2013;29:211-9 (In Russ.)]. ISSN 1995-0160
- Исаев Г.Г. Физиология дыхательных мышц. В кн.: Бреслав И.С., Исаев Г.Г. (ред.) Физиология дыхания. СПб.: Наука, 1994:178-97 [Isaev GG. The physiology of the respiratory muscles. In: Breslav I.S., Isaev G.G. (Eds.). *The physiology of respiration*. Saint Petersburg: Nauka, 1994:178-97 (In Russ.)].
- Чучалин А.Г., Покровский В.М. Дыхание. В кн.: Покровский В.М., Коротко Г.Ф. (ред.) Физиология человека. М.: Медицина, 2003: 347-85 [Chuchalin AG, Pokrovskii VM. Breath. In: Pokrovskii V.M., Korot'ko G.F. (Eds.) *Human physiology*. Moscow: Meditsina, 2003:347-85 (In Russ.)].
- Уэст Дж. Физиология дыхания. Основы. М.: Мир, 1988 [West J. *The physiology of respiration. The basics*. Moscow: Mir, 1988 (In Russ.)].
- Toledo NSG, Kodaira SK, Massarollo PCB, Osvaldo IP, Mies S. Right hemidiaphragmatic mobility: assessment with US measurement of craniocaudal displacement of left branches of portal vein. *Radiology*. 2003;228:389-94. PMID: 12819344. doi: 10.1148/radiol.2282011554
- Testa A, Soldati G, Giannuzzi R, Berardi S, Portale G, Silveri NG. Ultrasound M-mode assessment of diaphragmatic kinetics by anterior transverse scanning in healthy subjects. *Ultrasound Med Biol*. 2011;37:44-52. doi: 10.1016/j.ultrasmedbio.2010.10.004
- Ye X, Xiao H, Bai W, Liang Y, Chen M, Zhang S. Two-dimensional strain ultrasound speckle tracking as a novel approach for the evaluation of right hemidiaphragmatic longitudinal deformation. *Exp Ther Med*. 2013;6:368-72. doi: 10.3892/etm.2013.1133
- Orde SR, Boon AJ, Firth DG, Villarraga HR, Sekiguchi H. Diaphragm assessment by two dimensional speckle tracking imaging in normal subjects. *BMC Anesthesiol*. 2016;16:43. doi: 10.1186/s12871-016-0201-6
- Goutman SA, Hamilton JD, Swihart B, Foerster B, Feldman EL, Rubin JM. Speckle tracking as a method to measure hemidiaphragm excursion. *Muscle Nerve*. 2017;55:125-7. doi: 10.1002/mus.25380
- Ferrari G, Skaarup SH, Panero F, Wrightson JM. The diaphragm. In: Laursen CB, Rahman NM, Volpicelli G, eds. *Thoracic Ultrasound (ERS Monograph)*. Sheffield, European Respiratory Society, 2018:129-147. doi: 10.1183/2312508X.10006917
- Vivier E, Dessap AM, Dimassi S, Vargas F, Lyazidi A, Thille AW. Diaphragm ultrasonography to estimate the work of breathing during non-invasive ventilation. *Intensive Care Med*. 2012;38:796-803. doi: 10.1007/s00134-012-2547-7
- Marchioni A, Castaniere I, Tonelli R, Fantini R, Fontana M, Tabbi L, et al. Ultrasound-assessed diaphragmatic impairment is a predictor of outcomes in patients with acute exacerbation of chronic obstructive pulmonary disease undergoing noninvasive ventilation. *Critical Care*. 2018;22:109. doi: 10.1186/s13054-018-2033-x
- DiNino E, Gartman EJ, Sethi JM, McCool FD. Diaphragm ultrasound as a predictor of successful extubation from mechanical ventilation. *Thorax*. 2014;69:423-7. doi: 10.1136/thoraxjnl-2013-204111
- Boon AJ, Harper CJ, Ghahfarokhi LS, Strommen JA., Watson JC, Sorenson EJ. Two-dimensional ultrasound imaging of the diaphragm: quantitative values in normal subjects. *Muscle Nerve*. 2013;47:884-9. doi: 10.1002/mus.23702
- Harper CJ, Shahgholi L, Cieslak K, Hellyer NJ, Strommen JA, Boon AJ. Variability in diaphragm motion during normal breathing, assessed with B-mode ultrasound. *J Orthop Sport Phys Ther*. 2013;43:927-31. doi: 10.2519/jospt.2013.4931
- Ayoub J, Cohendy R, Dauzat M, Targhetta R, De la Coussaye JE, Bourgeois JM, et al. Non-invasive quantification of diaphragm kinetics using M-mode sonography. *Can J Anaesth*. 1997;44:739-44.
- Cohen E, Mier A, Heywood P, Murphy K, Boultebe J, Guz A. Excursion-volume relation of the right hemidiaphragm measured by ultrasonography and respiratory airflow measurements. *Thorax*. 1994;49:885-9. PMID: 7940428
- Harris RS, Giovannetti M, Kim BK. Normal ventilatory movement of the right hemidiaphragm studied by ultrasonography and pneumotachography. *Radiology*. 1983;146:141-4. doi: 10.1148/radiology.146.1.6849035
- Houston JG, Angus RM, Cowan MD, McMillan NC, Thomson NC. Ultrasound assessment of normal hemidiaphragmatic movement: relation to inspiratory volume. *Thorax*. 1994;49:500-3. doi: 10.1136/thx.49.5.500
- Boussuges A, Gole Y, Blanc P. Diaphragmatic motion studied by M-mode ultrasonography: methods, reproducibility, and normal values. *Chest*. 2009;135:391-400. doi: 10.1378/chest.08-1541
- Fedullo A, Lerner RM, Gibson J, Shayne DS. Sonographic measurement of diaphragmatic motion after coronary artery bypass surgery. *Chest*. 1992;102:1683-6. doi: 10.1378/chest.102.6.1683
- Cohn D, Benditt JO, Eveloff S, McCool FD. Diaphragm thickening during inspiration. *J Appl Physiol*. 1997;83:291-6. doi: 10.1152/jappl.1997.83.1.291
- Carrillo-Esper R, Perez-Calatayud AA, Arch-Tirado E, Díaz-Carrillo MA, Garrido-Aguirre E, Tapia-Velazco R, et al. Standardization of sonographic diaphragm thickness evaluations in healthy volunteers. *Respir Care*. 2016;61:920-4. doi: 10.4187/respcare.03999
- Ueki J, De Bruin PF, Pride NB. In vivo assessment of diaphragm contraction by ultrasound in normal subjects. *Thorax*. 1995;50:1157-61. PMID: 8553271
- Jubran A. Critical illness and mechanical ventilation: effects on the diaphragm. *Respir Care*. 2006;51:1054-61. PMID:16934168
- Grosu HB, Lee YI, Lee J, Eden E, Eikermann M, Rose KM. Diaphragm muscle thinning in patients who are mechanically ventilated. *Chest*. 2012;142:1455-60. doi: 10.1378/chest.11-1638
- Levine S, Nguyen T, Taylor N, Friscia ME, Budak MT, Rothenberg P, et al. Rapid disuse atrophy of diaphragm fibers in mechanically ventilated humans. *N Engl J Med*. 2008;358:1327-35. doi: 10.1056/NEJMoa070447
- Shanely RA, Zengeroglu MA, Lennon SL, Sugiura T, Yimlamai T, Enns D, et al. Mechanical ventilation-induced diaphragmatic atrophy is associated with oxidative injury and increased proteolytic activity. *Am J Respir Crit Care Med*. 2002;166:1369-74. doi: 10.1164/rccm.200202-088 OC
- Sassoon CS, Caiozzo VJ, Manka A, Sieck GC. Altered diaphragm contractile properties with controlled mechanical ventilation. *J Appl Physiol*. 2002 Jun;92(6):2585-95. doi: 10.1152/japplphysiol.01213.2001
- Goligher EC, Fan E, Herridge MS, Murray A, Vorona S, Brace D, et al. Evolution of diaphragm thickness during mechanical ventilation: impact of inspiratory effort. *Am J Respir Crit Care Med*. 2015;192:1080-8. doi: 10.1164/rccm.201503-0620OC
- Schepens S, Verbrughe W, Dams K, Corthouts B, Parizel PM, Jorens PG. The course of diaphragm atrophy in ventilated patients assessed with ultrasound: a longitudinal cohort study. *Crit Care*. 2015;19:422-8. doi: 10.1186/s13054-015-1141-0
- Kim WY, Suh HJ, Hong SB, Koh Y, Lim Ch-M. Diaphragm dysfunction assessed by ultrasonography: influence on weaning from mechanical ventilation. *Crit Care Med*. 2011;39:2627-30. doi: 10.1097/CCM.0b013e3182266408
- Jiang J, Tsai T, Jerng J. Ultrasonographic evaluation of liver/spleen movements and extubation outcome. *Chest*. 2004;126:179-85. PMID: 1524 9460
- Farghaly S, Hasan AA. Diaphragm ultrasound as a new method to predict extubation outcome in mechanically ventilated patients. *Aust Crit Care*. 2017;30:37-43. doi: 10.1016/j.aucc.2016.03.004
- Umbrello M, Formenti P, Longhi D, Galimberti A, Piva I, Pezzi A, et al. Diaphragm ultrasound as indicator of respiratory effort in critically ill patients undergoing assisted mechanical ventilation: a pilot clinical study. *Critical Care*. 2015;19:161. doi: 10.1186/s13054-015-0894-9

39. 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;6:8. doi: 10.1186/2036-7902-6-8
40. Davison A, Mulvey D. Idiopathic diaphragmatic weakness. *BMJ*. 1992;304:492-4. PMID: 1547426
41. ATS/ERS Statement on respiratory muscle testing. *Am J Respir Crit Care Med*. 2002;166:518-624. doi: 10.1164/rccm.166.4.518
42. Mier A, Brophy C, Moxham J, Green M. Twitch pressures in the assessment of diaphragm weakness. *Thorax*. 1989;44:990-6. PMID: 2617452
43. Verin E, Delafosse C, Straus C, Morélot-Panzini C, Avdeev S, Derenne JP, et al. Effects of muscle group recruitment on sniff transdiaphragmatic pressure and its components. *Eur J Appl Physiol*. 2001;85:593-8. doi: 10.1007/s0042101004
44. Doorduyn J, van Hees HW, van der Hoeven JG, Heunks LM. Monitoring of the respiratory muscles in the critically ill. *Am J Respir Crit Care Med*. 2013;187:20-7. Nlm PMID: 23103733
45. Авдеев С.Н., Черняк А.В. Оценка силы дыхательных мышц. В кн.: Чучалин А.Г. (ред.) Функциональная диагностика в пульмонологии. М.: Атмосфера, 2009:105-121 [Avdeev SN, Chernyak AV. Evaluation of the strength of the respiratory muscles. In: Chuchalin AG. (eds.) Functional diagnostics in pulmonology. Moscow: Atmosfera, 2009:105-121 (In Russ.)].
46. Alexander C. Diaphragm movements and the diagnosis of diaphragmatic paralysis. *Clin Radiol*. 1966;17:79-83. doi: 10.1016/S0009-9260(66)80128-9
47. Lerolle N, Guerot E, Dimassi S, Zegdi R, Faisy Ch, Fagon J-Y, et al. Ultrasonographic diagnostic criterion for severe diaphragmatic dysfunction after cardiac surgery. *Chest*. 2009;135:401-7. doi: 10.1378/chest.08-1531
48. Gottesman E, McCool FD. Ultrasound evaluation of the paralyzed diaphragm. *Am J Respir Crit Care Med*. 1997;155:1570-4. doi: 10.1164/ajrccm.155.5.9154859
49. Anderson L, Benditt JO, Conomos P, Hoppin FG, McCool FD, Sherman CB. Variability of diaphragm structure among healthy individuals. *Am J Respir Crit Care Med*. 1997;155:1323-8. PMID: 9105074
50. Arora NS, Rochester DF. COPD and human diaphragm muscle dimensions. *Chest*. 1987;91:719-24. PMID: 3568775
51. Boon AJ, Sekiguchi H, Harper CJ, Strommen JA, Ghahfarokhi LS, Watson JC, et al. Sensitivity and specificity of diagnostic ultrasound in the diagnosis of phrenic neuropathy. *Neurology*. 2014;83:1264-70. doi: 10.1212/WNL.0000000000000841
52. Суркова Е.Г., Александров А.Л., Перлей В.Е., Гичкин А.Ю. Оценка функции диафрагмы у больных хроническими заболеваниями легких по данным ультразвуковых методов исследования. *Ученые записки СПбГМУ им. акад. И.П. Павлова*. 2009;16(1):28-32 [Surkova EG, Aleksandrov AL, Perley VE, Gichkin AY. Evaluation of the diaphragm function in patients with chronic obstructive pulmonary disease (COPD). *Scientific notes Saint Petersburg GMU them. Acad. IP. Pavlova*. (Uchenye zapiski Saint Petersburg GMU im. akad. IP. Pavlova). 2009;16(1):28-32 (In Russ.)].
53. Александров А.Л., Перлей В.Е., Гичкин А.Ю., Суркова Е.Г., Яковлева Н.Г., Кузубова Н.А. Взаимосвязь функционального состояния диафрагмы с показателями функции внешнего дыхания у больных ХОБЛ с тяжелым и среднетяжелым течением. *Ученые записки СПбГМУ им. акад. И.П. Павлова*. 2012;19(3):66-9 [Aleksandrov AL, Perley VE, Gichkin AY, Surkova EG, Yakovleva NG, Kuzubova NA. The relationship between the diaphragm functional condition and the PFT parameters in patients with severe and moderate COPD. *Scientific notes Saint Petersburg GMU them. Acad. IP. Pavlova* (Uchenye zapiski Saint Petersburg GMU im. akad. IP. Pavlova). 2012;19(3):66-9 (In Russ.)].
54. Горбунков С.Д., Варламов В.В., Гичкин А.Ю., Перлей В.Е., Черный С.М., Романихин А.И. и др. Ультразвуковая оценка состояния диафрагмы у больных, прошедших отбор для хирургической редукции объема легких. *Вестник хирургии имени И.И. Грекова*. 2015;174(5):13-7 [Gorbunkov SD, Varlamov VV, Gichkin AY, Perley VE, Chernyi SM, Romanikhin AI, Syrovnev VA, Agishev AS, Akopov AL. Ultrasonic assessment of diaphragm condition of the patients, who passed the selection for lung volume reduction surgery. *Vestnik khirurgii imeni I. I. Grekova*. 2015;174(5):13-7 (In Russ.)]. doi: 10.24884/0042-4625-2015-174-5-13-17
55. Ottenheijm CA, Heunks LM, Dekhuijzen RP. Diaphragm adaptations in patients with COPD. *Respir Res*. 2008;9:12. doi: 10.1186/1465-9921-9-12
56. Ottenheijm CA, Heunks LM, Sieck GC, Zhan WZh, Jansen SM, Degens H, et al. Diaphragm dysfunction in chronic obstructive pulmonary disease. *Am J Respir Crit Care Med*. 2005;172:200-5. doi: 10.1164/rccm.200502-262OC
57. Macklem PT, Macklem DM, De Troyer A. A model of inspiratory muscle mechanics. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*. 1983;55:547-57. doi: 10.1152/jappl.1983.55.2.547
58. Clanton TL, Levine S. Respiratory muscle fiber remodeling in chronic hyperinflation: dysfunction or adaptation? *J Appl Physiol*. 2009;107:324-35. PMID: 19359619
59. Baria MR, Shahgholi L, Sorenson EJ, Harper CJ, Lim KG, Strommen JA, et al. B-mode ultrasound assessment of diaphragm structure and function in patients with COPD. *Chest*. 2014;146:680-5. doi: 10.1378/chest.13-2306
60. Paulin E, Yamaguti WP, Chammas MC, Shibao S, Stelmach R, Cukier A, et al. Influence of diaphragmatic mobility on exercise tolerance and dyspnea in patients with COPD. *Respir Med*. 2007;101:2113-8. doi: 10.1016/j.rmed.2007.05.024
61. Dos Santos Yamaguti WP, Paulin E, Shibao S, Chammas MC, Salge JM, Ribeiro M, et al. Air trapping: the major factor limiting diaphragm mobility in chronic obstructive pulmonary disease patients. *Respirology*. 2008;13:138-44. doi: 10.1111/j.1440-1843.2007.01194.x
62. De Troyer A. Effect of hyperinflation on the diaphragm. *Eur Respir J*. 1997;10:708-13. doi: 10.1183/09031936.97.100307
63. Whitelaw WA, Hajdo LE, Wallace JA. Relationships among pressure, tension, and shape of the diaphragm. *J Appl Physiol*. 1983;62:180-6. doi: 10.1152/jappl.1983.55.6.1899
64. Similowski T, Duguet A, Prodanovic H, Straus C. Exploration du diaphragme en réanimation. *Réanimation*. 2003;12:6-18.
65. Tobin MJ. The respiratory muscles in disease. *Clin Chest Med*. 1988;9:263-86. PMID: 3292127
66. Jung B, Sebbane M, Rossel N, Rossel N, Chanques G, Futier E, et al. Moderate and prolonged hypercapnic acidosis may protect against ventilator-induced diaphragmatic dysfunction in healthy piglet: an in vivo study. *Crit Care*. 2013;17:R15. doi: 10.1186/cc12486
67. Авдеев С.Н. Неинвазивная вентиляция легких у пациентов с хронической обструктивной болезнью легких в стационаре и домашних условиях. *Пульмонология*. 2017;27(2):232-49 [Avdeev SN. Non_invasive ventilation in patients with chronic obstructive pulmonary disease in a hospital and at home. *Russian Pulmonology*. 2017;27(2):232-49 (In Russ.)]. doi: 10.18093/0869-0189-2017-27-2-232-249
68. Bobbia X, Clement A, Claret PG, Bastide S, Alonso S, Wagner P, et al. Diaphragmatic excursion measurement in emergency patients with acute dyspnea: toward a new diagnostic tool? *Am J Emerg Med*. 2016;34:1653-17. doi: 10.1016/j.ajem.2016.05.055
69. Antenora F, Fantini R, Iattoni A, Castaniere I, Sdanganelli A, Livrieri F, et al. Prevalence and outcomes of diaphragmatic dysfunction assessed by ultrasound technology during acute exacerbation of chronic obstructive pulmonary disease: a pilot study. *Respirology*. 2017;22(2):338-44. doi: 10.1111/resp.12916

Поступила 31.10.2018