

Объемная капнография: возможности применения в пульмонологической практике

В.Н.Абросимов, Ю.Ю.Бяловский, С.В.Субботин, И.Б.Пономарева

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П.Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации: 390026, Рязань, ул. Высоковольная, 9

Информация об авторах

Абросимов Владимир Николаевич — д. м. н., профессор, заведующий кафедрой терапии факультета дополнительного профессионального образования с курсом семейной медицины Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П.Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; тел.: (4912) 96-27-93; e-mail: abrosimov_r@mail.ru

Бяловский Юрий Юльевич — д. м. н., профессор, заведующий кафедрой патофизиологии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П.Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; тел.: (4912) 46-08-84; e-mail: b_uu@mail.ru

Субботин Сергей Викторович — очный аспирант кафедры терапии факультета дополнительного профессионального образования с курсом семейной медицины Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П.Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; тел.: (4912) 96-27-93; e-mail: subbotinsv.89@mail.ru

Пономарева Ирина Борисовна — к. м. н., ассистент кафедры терапии факультета дополнительного профессионального образования с курсом семейной медицины Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П.Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; тел.: (4912) 96-27-93; e-mail: docib@ya.ru

Резюме

Необходимость изучения новых методов диагностики и оценки параметров дыхания пациента продиктована широким распространением заболеваний респираторной системы. Одним из перспективных инструментов оценки легочной функции является метод объемной капнографии, отражающий особенности паттерна элиминации углекислого газа (CO_2) в объеме выдоха, при помощи которого анализируется динамика выделения CO_2 по отношению к дыхательному объему и представляется интегральная оценка функционального состояния органов дыхания в виде следующих расчетных показателей: индекс эмфиземы, объем «мертвого» пространства, наклон фаз 2 и 3 и т. п. В обзоре освещены вопросы, касающиеся возможностей применения метода объемной капнографии в клинической практике, в частности при диагностике хронической обструктивной болезни легких (ХОБЛ), бронхиальной астмы (БА), эмфиземы и других заболеваний легких. Продемонстрировано, что неинвазивный, безопасный и простой в использовании метод объемной капнографии может использоваться для оценки параметров дыхания у пациентов с ХОБЛ, БА и эмфиземой легких, однако требуется дальнейшее изучение его диагностических возможностей с целью последующего внедрения в пульмонологическую практику.

Ключевые слова: объемная (волюметрическая) капнография, капнограмма, вентиляция, перфузия, «мертвое» пространство, индекс эмфиземы, бронхиальная астма, хроническая обструктивная болезнь легких, эмфизема легких.

Для цитирования: Абросимов В.Н., Бяловский Ю.Ю., Субботин С.В., Пономарева И.Б. Объемная капнография: возможности применения в пульмонологической практике. *Пульмонология*. 2017; 27 (1): 65–70. DOI: 10.18093/0869-0189-2017-27-1- 65-70

Volumetric capnography: abilities in practical pulmonology

Vladimir N. Abrosimov, Yuriy Yu. Byalovskiy, Sergey V. Subbotin, Irina B. Ponomareva

I.P.Pavlov Ryazan State Medical University, Healthcare Ministry of Russia: ul. Vysokovol'tnaya 9, Ryazan', 390026, Russia

Author information

Vladimir N. Abrosimov, Doctor of Medicine, Professor, Head of Department of Therapy, Faculty of Postgraduate Training and Family Medicine, I.P.Pavlov Ryazan State Medical University, Healthcare Ministry of Russia; tel. / fax: (4912) 96-27-93; e-mail: abrosimov_r@mail.ru

Yuriy Yu. Byalovskiy, Doctor of Medicine, Professor, Head of Department of Pathophysiology, I.P.Pavlov Ryazan State Medical University, Healthcare Ministry of Russia; tel.: (4912) 46-08-84; e-mail: b_uu@mail.ru

Sergey V. Subbotin, Postgraduate student, Department of Therapy, Faculty of Postgraduate Training and Family Medicine, I.P.Pavlov Ryazan State Medical University, Healthcare Ministry of Russia; tel.: (4912) 96-27-93; e-mail: subbotinsv.89@mail.ru

Irina B. Ponomareva, Candidate of Medicine, Assistant Lecturer, Department of Therapy, Faculty of Postgraduate Training and Family Medicine, I.P.Pavlov Ryazan State Medical University, Healthcare Ministry of Russia; tel.: (4912) 96-27-93; e-mail: docib@ya.ru

Abstract

The aim of this review was to analyze abilities of a novel diagnostic method intended to measure the lung function. Volumetric capnography is one of the most promising tools for assessing pulmonary function. This method reflects CO_2 elimination pattern at the exhaled air volume. Changes in CO_2 portion at the tidal volume are related to the integrated evaluation of the respiratory function and could be expressed as the following parameters: emphysema index, the dead space volume, phases 2 and 3 slopes, etc. Possible use of the volumetric capnography for diagnosis of chronic obstructive pulmonary disease, asthma, emphysema, and other respiratory diseases is discussed in the article. This method is simple, non-invasive, and safe. Diagnostic value of the volumetric capnography needs further investigation in order to implement this method in clinical practice.

Key words: volumetric capnography, a capnogram, ventilation, perfusion, dead space, emphysema index, asthma, chronic obstructive pulmonary disease, emphysema.

For citation: Abrosimov V.N., Byalovskiy Yu.Yu., Subbotin S.V., Ponomareva I.B. Volumetric capnography: abilities in practical pulmonology. *Russian Pulmonology*. 2017; 27 (1): 65–70 (in Russian). DOI: 10.18093/0869-0189-2017-27-1- 65-70

Известно, что человек при дыхании выделяет углекислый газ (CO_2). Деятельность системы внешнего дыхания интегрально определяется уровнем CO_2 . В настоящее время благодаря капнографии показатели парциального давления и объема выделения CO_2 применяются для определения кардиопульмонального статуса пациента и состояния его газообмена [1].

Наиболее активно проблемой оценки CO_2 воздуха стали заниматься во время Первой мировой войны, когда ученые столкнулись с его повышенной концентрацией на борту субмарин. В последствии Ф.Флюри и Ф.Церник (1938) в разделе «Воздух подводных лодок» отметили, что вопрос о CO_2 оказался более серьезным, чем проблема O_2 ¹.

Метод, основанный на химической абсорбции, впервые применен J.Haldane (1912) для определения CO_2 в воздухе или смеси газов [2]. В 1930–40 гг. распространение получила оценка CO_2 с помощью метода инфракрасной абсорбции. При использовании указанного метода анестезиологом J.O.Elam и исследователем M.Liston сконструирован первый медицинский капнограф, а в середине 1950 гг. капнография нашла свое применение в клинической практике [3]. J.O.Elam et al. (1955) [4] впервые опубликованы капнографические кривые дыхания. На рис. 1 представлена капнограмма, показывающая количество выделенного CO_2 , соотнесенного ко времени. Она делится на 3 фазы (1–3). Кроме того, выделяются 2 угла: угол α – между фазами 2 и 3 и угол β – между фазами 3 и 4, по величине которых можно косвенно судить о состоянии дыхательной системы. Наиболее часто оценивается количество CO_2 , выделенное к концу выдоха (PET_{CO_2}), т. к. данный показатель аналогичен таковому парциального давления CO_2 в артериальной крови (PA_{CO_2}).

Объемная капнография

В последние годы появился научный интерес к новому методу – объемной (волюметрической) капнографии (VC_{ap}). На сегодняшний день существует

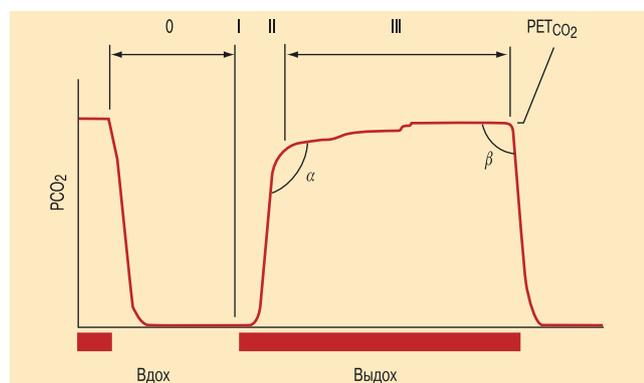


Рис. 1. Капнограмма: 0 – вдох; I – фаза 1; II – фаза 2; III – фаза 3; PET_{CO_2} – парциальное давление углекислого газа (PCO_2) конца выдоха; α – угол альфа; β – угол бета
Figure 1. A capnogram: 0, expiration; I, the phase 1; II, the phase 2; III, the phase 3; PET_{CO_2} , a partial pressure of CO_2 at the end of expiration; α , alfa slope; β , beta slope

¹ Абросимов Н.З. Респираторный ацидоз (патогенез, клиника, лечение и профилактика): Дисс. ... д-ра мед. наук. Рязань; 1964.



Рис. 2. Спирограф SpiroScout (Ganshorn, Германия), оснащенный функцией объемной капнографии
Figure 2. Spirograph 'SpiroScout' (Ganshorn, Germany) with the function of volumetric capnography

несколько приборов для проведения этой методики, среди которых – ультразвуковой компьютерный спирограф SpiroScout (Ganshorn, Германия), оснащенный функцией объемной капнографии (рис. 2).

В отличие от капнографии, зависимой от времени, при объемной капнографии оценивается динамика CO_2 , соотнесенная к величине дыхательного объема (VT) с последующим расчетом показателей «мертвого» пространства, наклона фаз 2 и 3, индекса эмфиземы. Графическим отображением объемной капнографии является объемная капнограмма (волюмокапнограмма) (рис. 3). Впервые метод волюметрической оценки выдыхаемого воздуха описан W.S.Fowler (1948), в работе которого представлена кривая однодыхательного теста азота (SBT-N_2) для

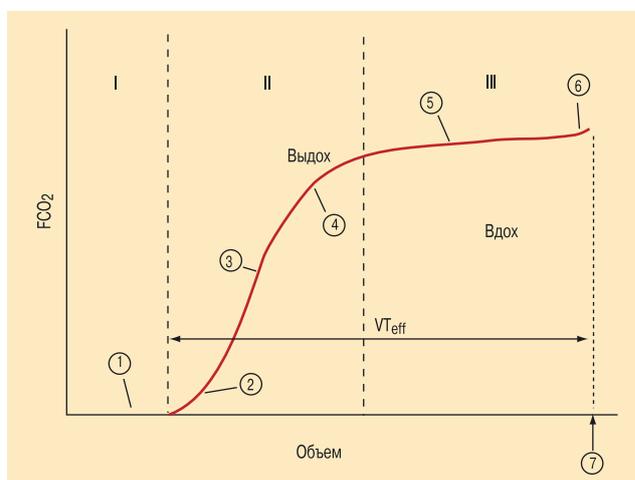


Рис. 3. Объемная капнограмма [1]: FCO_2 – фракционная концентрация углекислого газа в выдыхаемом воздухе; VT_{eff} – эффективный дыхательный объем; I – фаза 1; II – фаза 2; III – фаза 3; 1 – объем «мертвого» пространства; 2 – переход фазы 1 в фазу 2; 3 – наклон фазы 2; 4 – угол α (переход фазы 2 в фазу 3); 5 – наклон фазы 3; 6 – конец выдоха; 7 – выделенный объем. Область между кривыми представляет собой объем выделенного CO_2
Figure 3. Volumetric capnogram [1]: FCO_2 , fractional concentration of CO_2 in the exhaled air; VT_{eff} , the effective tidal volume; I, the phase 1; II, the phase 2; III, the phase 3; 1, the dead space volume; 2, transition from the phase 1 to the phase 2; 3, the phase 2 decline; 4, α slope (transition from the phase 2 to the phase 3); 5, the phase 3 decline; 6, the end of expiration; 7, the selected volume. The area between the curves corresponds to the exhaled CO_2 volume.

определения «мертвого» пространства, разделенная на фазы 1–3. Это фазное деление применяется и сейчас для описания кривых волюметрических капнограмм (SBT-CO₂), т. к. SBT-N₂ и SBT-CO₂ имеют схожую форму² [5].

Каждая фаза объемной капнограммы имеет свою диагностическую ценность. Фаза 1 отображает углекислый газ, выдыхаемый из верхних дыхательных путей (т. е. газ анатомического «мертвого» пространства), которое обычно содержит небольшое количество CO₂ (оно столь незначительно, что приравнивается к нулю). Поэтому увеличение фазы 1 показывает увеличение вентиляции анатомического «мертвого» пространства (VD_{aw}).

Фаза 2 представлена углекислотой, выделенной как из дыхательных путей, так и из альвеол. Фаза 2 отражает изменения перфузии. Она характеризуется быстрым ростом концентрации CO₂. Уменьшение фазы 2 может быть показателем уменьшения перфузии и эти изменения можно наблюдать при тяжелых нарушениях легочной функции. Если «опустошение» альвеол грубо неравномерно, как при серьезных эмфизематозных и обструктивных легочных заболеваниях, наклон фазы 2 будет покатым.

Фаза 3, или альвеолярное плато, демонстрирует CO₂, выделенный из альвеол, предоставляя собой информацию об изменении газового распределения, перфузии и вентиляции легочной периферии [6]. Фаза 3 изменяется при многих патологических состояниях. Горизонтальное плато показывается легкими, которые достаточно равномерно «добавляют» CO₂ к каждой порции выдыхаемого газа. Увеличение наклона фазы 3 свидетельствует об увеличении неравномерности распределения вентиляционно-перфузионного соотношения (V / Q), что встречается у пациентов с бронхиальной астмой (БА), эмфиземой или легочными ателектазами.

Анализ объемной капнограммы позволяет произвести исследование «мертвого» пространства. «Мертвое» пространство – это часть дыхательной системы, которая вентилируется, но не участвует в газообмене (не выделяет CO₂ и не поглощает O₂). Выделяются анатомическое (представленное воздухоносными путями – VD_{aw}) и альвеолярное (недостаточно перфузируемыми или неперфузируемыми альвеолами – VD_{alv}) «мертвые» пространства. Сумма анатомического и альвеолярного «мертвых» пространств составляет физиологическое «мертвое» пространство (VD_{phys})³ [7, 8]. Величина «мертвого» пространства изменяется вслед за изменением вентиляции и / или перфузии, что может иметь значение для диагностики тромбоэмболии легочных артерий, респираторного дистресс-синдрома, БА, хронической обструктивной болезни легких (ХОБЛ), эмфиземы легких и бронхоэктатической болезни [9].

Возможности клинического применения

В ряде исследований показано, что диагностические возможности объемной капнографии могут использоваться в реанимационной, педиатрической и пульмонологической практике.

В анестезиологии и реанимации объемная капнография применяется для оценки адекватности спонтанного дыхания, успешности перехода на самостоятельное дыхание после механической вентиляции легких, подбора параметров искусственной вентиляции легких, контроля целостности контура дыхательного аппарата, диагностики остановки кровообращения и эффективности реанимационных мероприятий, контроля проведения интубации трахеи, диагностики нарушений вентиляционно-перфузионного соотношения, мониторинга гиперметаболических состояний и т. п. [10–15].

В последнее время отмечается повышенный интерес к изучению объемной капнографии в пульмонологии. Паттерн элиминации CO₂ в объеме выдоха, полученный при VC_{ap}, позволяет рассчитать показатели, при которых обнаруживаются нарушения V / Q. Изучаются возможности указанной методики в диагностике и оценке эффективности лечения тромбоэмболии легочных артерий [16–20], респираторного дистресс-синдрома [9, 21], БА [22–24], ХОБЛ и бронхоэктазов [6, 24–28], эмфиземы легких³ [29] и т. п.

При анализе расчетных показателей объемных капнограмм у пациентов с эмфиземой легких выявлены характерные особенности, имеющие диагностическое значение. Оригинальным является «эмфизема-тест», с помощью которого определяется интегральный показатель – наклон линии регрессии индекса смешанного воздуха. U.Smidt³ [29] показано, что при эмфиземе легких наибольшие изменения претерпевает объем смешанного воздуха, содержащего от 25 до 50 % максимальной концентрации CO₂ (V_{m25–50}). Этот показатель получил название индекса эмфиземы (рис. 4). Он зависит от объема вдоха (VT_{in}), поэтому для диагностики эмфиземы используется отношение V_{m25–50} / VT_{in}. Проводились исследования, где индекс эмфиземы использовался для определения фенотипа ХОБЛ [29], по результатам которых установлено, что индекс эмфиземы достоверно выше у пациентов с ХОБЛ по сравнению с контрольной группой; также сделан вывод о том, что объемная капнография позволяет объективизировать и определить выраженность эмфизематозных изменений у таких пациентов.

Другим важным показателем объемной капнографии у пациентов с БА и ХОБЛ является наклон фазы 3 (рис. 5). Периферические отделы легких (в т. ч. дистальные дыхательные пути, бронхиолы),

² Jaffe M.B. Volumetric capnography – a brief history. In: Abstracts of the American Society of Anesthesiologists (ASA) 2011 Annual Meeting. Chicago; 2011.

³ Бяловский Ю.Ю., Мирошкина Т.А. Диагностическое значение объемной капнографии. В кн.: Материалы Межрегиональной научной конференции Рязанского государственного медицинского университета имени академика И.П.Павлова с международным участием. Рязань: РИО РязГМУ; 2014.

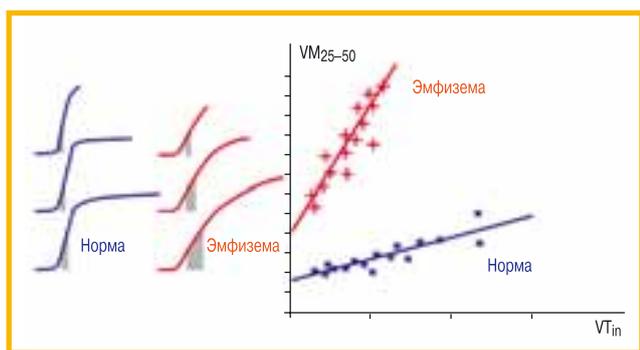


Рис. 4. Кривые показателей «эмфизема-тест»: в норме (обозначено красным) и при эмфиземе легких (обозначено синим) – объем смешанного воздуха, содержащего от 25 до 50 % максимальной концентрации CO_2 ; VT_{in} – объем вдоха

Figure 4. The ‘emphysema-test’ curves: normal (in red); in emphysema (in blue). VM_{25-50} , mixed air volume containing 25 to 50% of the maximal concentration of CO_2 ; VT_{in} , the inspiratory volume

которые известны как «тихие», «молчащие» легочные зоны и которые первыми вовлекаются в патологический процесс при БА, эмфиземе и ХОБЛ, не могут быть оценены с помощью обычных функциональных тестов, но их состояние можно косвенно определить с помощью объемной капнографии [21]. Нарушение функции дыхания объясняется структурными и воспалительными изменениями дыхательных путей, в первую очередь бронхиол, которые вызывают неравномерное распределение воздуха в легочной ткани. В исследованиях *B. Dutrieue et al.* (2000) [30] и *L. Veronez et al.* (2014) [6] показано, что изменение наклона фазы 3 отражает неравномерность V/Q , которая возникает из-за патологии мелких бронхов и бронхиол.

При исследовании объемной капнографии в педиатрической практике установлено, что у здоровых детей и молодых людей часто наблюдается почти горизонтальное плато (наклон фазы 3). *R.S. Ream et al.* [31] проанализировано состояние капнографических кривых у здоровых детей в возрасте от 5 мес. до 17 лет и доказана прогрессивная нормализация наклона фазы 3 с процессом взросления [16, 30, 32].

C.B. Celize et al. (2011) в исследовании [23] продемонстрирована возможность использования объем-

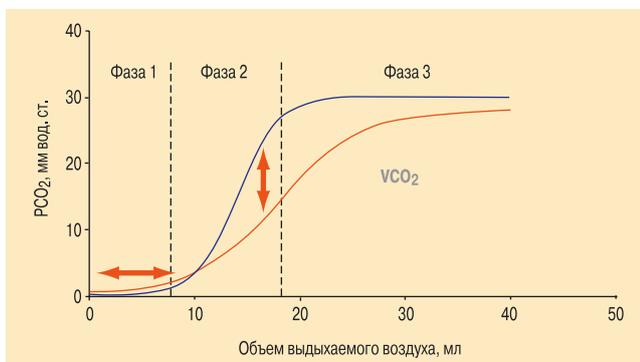


Рис. 5. Объемная капнограмма при обструкции дыхательных путей (синяя линия – в норме, красная линия – при обструкции дыхательных путей). PCO_2 – парциальное давление углекислого газа (CO_2); VCO_2 – объем CO_2

Figure 5. Volumetric capnography: normal (in blue) and in the airway obstruction (in red). PCO_2 , partial tension of CO_2 ; VCO_2 , volume of CO_2

ной капнографии для определения функции дыхания у детей и подростков с персистирующей БА. Сделан вывод о том, что увеличение наклона фазы 3 объемных капнограмм говорит о неоднородности вентиляции у больных БА, следовательно, этот показатель можно использовать для диагностики обструктивных и других вентиляторных нарушений. Кроме того, установлено, что бронходилатация влияет на наклон фазы 2, а наклон фазы 3 не меняется, что объясняется увеличением объема анатомического «мертвого» пространства. В исследовании также проводилась провокационная проба с метахолином, при которой уменьшался объем VD_{aw} , вызывая бронхообструкцию, и, следовательно, увеличивался наклон фазы 2. Помимо этого, при воздействии метахолина увеличивался наклон фазы 3 за счет усугубления неоднородности V/Q .

Неоднозначные данные, требующие дальнейшего изучения, получены *K. Olsson et al.* [33]. Обнаружено повышение наклона фазы 3 при объемной капнографии после бронхиальной провокации с метахолином у здоровых взрослых ($n = 19$), связанное с бронхоконстрикцией.

Один из важных показателей объемной капнографии – объем «мертвого» пространства (VD). Влияние бронхообструкции при ХОБЛ и БА на величину VD показано в исследовании *A.H. Kars et al.* (1995) [24]. Выявлена корреляция данного показателя с тяжестью заболевания. Это происходит потому, что обструктивные заболевания легких различной этиологии протекают с вовлечением периферических дыхательных путей, которые обеспечивают значительную долю углекислого газа «мертвого» пространства.

В работе *P.V. Romero et al.* (2007) [25] показана целесообразность использования объемной капнографии как одного из альтернативных методов исследования функции дыхания для оценки функциональных нарушений у пациентов с ХОБЛ. Установлено, что объемная капнография может быть использована у пациентов, которые надлежащим образом не могут выполнить дыхательный маневр при проведении спирографии. *G.S. Qi et al.* [26] определено, что волюметрические показатели, такие как объем «мертвого» пространства, наклоны фаз 2 и 3, а также их отношение к среднему дыхательному объему, являются ценными при дифференциальной диагностике пациентов с ХОБЛ и здоровых лиц.

Заключение

Неинвазивный, безопасный и простой в использовании метод объемной капнографии может использоваться для оценки параметров дыхания у пациентов с ХОБЛ, БА и эмфиземой легких, однако требуется дальнейшее изучение его диагностических возможностей с целью последующего внедрения в пульмонологическую практику.

Конфликт интересов

Конфликт интересов отсутствует. Публикация подготовлена без участия спонсоров.

Conflict of interest

There is no conflict of interest. The study was performed without any sponsorship.

Литература

1. Gravenstein J.S., Jaffe M.B., Gravenstein N., Paulus D.A., eds. Capnography. Cambridge: Cambridge Univ. Press; 2011.
2. Jaffe M.B. Volumetric Capnography – The Next Advance in CO₂ Monitoring. Respiroics Inc.; 2012.
3. Бяловский Ю.Ю., Абросимов В.Н. Капнография в общеврачебной практике. Рязань: РязГМУ; 2006.
4. Elam J.O., Brown E.L., Ten Pas R.H. Carbon dioxide homeostasis during anesthesia. *Instrumentation. Anesthesiology*. 1955; 16: 876–885.
5. Fletcher R. The single breath test for carbon dioxide (Thesis). Sweden: Lund; 1980.
6. Veronez L., Pereira M.C., da Silva S.M. et al. Volumetric capnography for the evaluation of chronic airways diseases. *Intern. J. COPD*. 2014; 9: 983–989. DOI: 10.2147/COPD.
7. Kalenda Z. Mastering Iffrared Capnography. Netherlands: Kerckebosh-Zeist; 1989.
8. Tusman G., Scandurra A., Bohm S.H. et al. Model fitting of volumetric capnograms improves calculations of airway deadspace and slope of phase III. *J. Clin. Monit. Comput.* 2009; 23 (4): 197–206. DOI: 10.1007/s10877-009-9182-z.
9. Kallett R.H., Daniel B.M., Garcia O., Matthay M.A. Accuracy of physiologic deadspace measurements in patients with acute respiratory distress syndrome using volumetric capnography: comparison with the metabolic monitor method. *Respir. Care*. 2005; 50 (4): 462–427.
10. Verschuren F., Liistro G., Coffeng R. et al. Volumetric capnography as a screening test for pulmonary embolism in the emergency department. *Chest*. 2004; 125 (5): 841–850.
11. Verschuren F., Heinonen E., Clause D. et al. Volumetric capnography as a bedside monitoring of thrombolysis in major pulmonary embolism. *Intensive Care Med*. 2004 (11); 30: 2129–2130. DOI: 10.1007/s00134-004-2444-9.
12. Tusman G., Suarez-Sipmann F., Böhm S.H. et al. Monitoring deadspace during recruitment and PEEP titration in an experimental model. *Intens. Care Med*. 2006; 32 (11): 1863–1871. DOI: 10.1007/s00134-006-0371-7.
13. Cheifetz I.M., Myers T.R. Respiratory therapies in the critical setting: should every mechanically ventilated patient be monitored with capnography from intubation to extubation? *Respir. Care*. 2007; 52 (4): 423–438.
14. Tusman G., Bohm, S.H., Suarez Sipmann F., Maisch S. Lung recruitment improves the efficiency of ventilation and gas exchange during one-lung ventilation anesthesia. *Anesth. Analg.* 2004; 98 (6): 1604–1609.
15. Gustafsson P.M., Ljungberg H.K., Kjellman B. Peripheral airway involvement in asthma assessed by single-breath SF₆ and He washout. *Eur. Respir. J.* 2003; 21 (6): 1033–1039.
16. Arnold J.H., Stenz R.I., Grenier B., Thompson J.E. Singlebreath CO₂ analysis as a predictor of lung volume change in a model of acute lung injury. *Crit. Care Med*. 2000; 28 (3): 760–764.
17. Kline J.A., Israel E.G., Michelson E.A. et al. Diagnostic accuracy of a bedside D-dimer assay and alveolar deadspace measurement for rapid exclusion of pulmonary embolism. *JAMA*. 2001; 285 (6): 761–768.
18. Verschuren F., Heinonen E., Clause D. et al. Volumetric capnography as a bedside monitoring of thrombolysis in major pulmonary embolism. *Intensive Care Med*. 2004; 30 (11): 2129–2132. DOI: 10.1007/s00134-004-2444-9.
19. Moreira M.M., Terzi R.G., Carvalho C.H. et al. Alveolar dead space and capnographic variables before and after thrombolysis in patients with acute pulmonary embolism. *Vasc. Health Risk Manag.* 2009; 5 (1): 9–12.
20. Moreira M.M., Terzi R.G., Paschoal I.A. et al. Thrombolysis in massive pulmonary embolism based on the volumetric capnography. *Arq. Bras. Cardiol.* 2010; 95 (4): e97–e99.
21. Romero P.V., Lucangelo U., Lopez Aguilar J. et al. Physiologically based indices of volumetric capnography in patients receiving mechanical ventilation. *Eur. Respir. J.* 1997; 10: 1309–1315.
22. Koulouris N.G., Latsi P., Stavrou E. et al. Unevenness of ventilation assessed by the expired CO₂ gas volume versus V(T) curve in asthmatic patients. *Respir. Physiol. Neurobiol.* 2004; 140 (3): 293–300. DOI: 10.1016/j.resp.2004.01.005.
23. Almeida C.C., Almeida-Júnior A.A., Ribeiro M.Á. et al. Volumetric capnography to detect ventilation inhomogeneity in children and adolescents with controlled persistent asthma. *J. Pediatr. (Rio J)*. 2011; 87 (2): 163–168.
24. Kars A.H., Goorden G., Stijnen T. et al. Does phase II of the expiratory PCO₂ versus volume curve have diagnostic value in emphysema patients? *Eur. Respir. J.* 1995; 8 (1): 86–92.
25. Romero P.V., Rodriguez B., de Oliveira D. et al. Volumetric capnography and chronic obstructive pulmonary disease staging. *Int. J. COPD*. 2007; 2 (3): 381–391.
26. Qi G.S., Gu W.C., Yang W.L. et al. The ability of volumetric capnography to distinguish between chronic obstructive pulmonary disease patients and normal subjects. *Lung*. 2014; 192 (5): 661–668. DOI:10.1007/s00408-014-9615-4.
27. Ribeiro M.Á, Silva M.T., Ribeiro J.D. et al. Volumetric capnography as a tool to detect early peripheral lung obstruction in cystic fibrosis patients. *J. Pediatr. (Rio J)*. 2012; 88 (6): 509–517. DOI:10.2223/JPED.2233.
28. Пономарева И.Б., Субботин С.В. Возможности метода объемной капнографии в изучении легочных функций у больных ХОБЛ. *Наука молодых (Eruditio Juvenium)*. 2016; 1: 67–73.
29. Абросимов В.Н., Пономарева И.Б. Возможности метода объемной капнографии в определении фенотипа ХОБЛ. Одышка и ассоциированные синдромы: межрегиональный сборник научных трудов. Рязань; 2014: 126–130.
30. Dutrieue B., Vanholsbeeck F., Verbank S., Paiva M.A. Human acinar structure for simulation of realistic alveolar plateau slopes. *J. Appl. Physiol.* 2000; 89 (5): 1859–1867.
31. Ream R.S., Screiner M.S., Neff J.D. et al. Volumetric capnography in children. Influence of growth on the alveolar plateau slope. *Anesthesiology*. 1995; 82 (1): 64–73.
32. Stenz R.I., Grenier B.T., Thompson J.E., Arnold J.H. Single breath CO₂ analysis as a predictor of lung volume in a healthy animal model during controlled ventilation. *Crit. Care Med*. 1998; 26 (8): 1409–1413.
33. Olsson K., Greiff L., Karlefors F. et al. Changes in airway dead space in response to methacholine provocation in normal subjects. *Clin. Physiol.* 1999; 19 (5): 426–432.

Поступила 17.06.16

References

1. Gravenstein J.S., Jaffe M.B., Gravenstein N., Paulus D.A., eds. Capnography. Cambridge: Cambridge Univ. Press; 2011.
2. Jaffe M.B. Volumetric Capnography – The Next Advance in CO₂ Monitoring. Respiroics Inc.; 2012.
3. Byalovskiy Yu.Yu., Abrosimov V.N. Capnography in general medical practice. Ryazan': RyazGMU; 2006 (in Russian).
4. Elam J.O., Brown E.L., Ten Pas R.H. Carbon dioxide homeostasis during anesthesia. *Instrumentation. Anesthesiology*. 1955; 16: 876–885.

5. Fletcher R. The single breath test for carbon dioxide (Thesis). Sweden: Lund; 1980.
6. Veronez L., Pereira M.C., da Silva S.M. et al. Volumetric capnography for the evaluation of chronic airways diseases. *Intern. J. COPD*. 2014; 9: 983–989. DOI: 10.2147/COPD.
7. Kalenda Z. Mastering Ifrared Capnography. Netherlands: Kerckebosh-Zeist; 1989.
8. Tusman G., Scandurra A., Bohm S.H. et al. Model fitting of volumetric capnograms improves calculations of airway deadspace and slope of phase III. *J. Clin. Monit. Comput.* 2009; 23 (4): 197–206. DOI: 10.1007/s10877-009-9182-z.
9. Kallett R.H., Daniel B.M., Garcia O., Matthay M.A. Accuracy of physiologic deadspace measurements in patients with acute respiratory distress syndrome using volumetric capnography: comparison with the metabolic monitor method. *Respir. Care*. 2005; 50 (4): 462–427.
10. Verschuren F., Liistro G., Coffeng R. et al. Volumetric capnography as a screening test for pulmonary embolism in the emergency department. *Chest*. 2004; 125 (5): 841–850.
11. Verschuren F., Heinonen E., Clause D. et al. Volumetric capnography as a bedside monitoring of thrombolysis in major pulmonary embolism. *Intensive Care Med*. 2004 (11); 30: 2129–2130. DOI: 10.1007/s00134-004-2444-9.
12. Tusman G., Suarez-Sipmann F., Böhm S.H. et al. Monitoring deadspace during recruitment and PEEP titration in an experimental model. *Intensive Care Med*. 2006; 32 (11): 1863–1871. DOI: 10.1007/s00134-006-0371-7.
13. Cheifetz I.M., Myers T.R. Respiratory therapies in the critical setting: should every mechanically ventilated patient be monitored with capnography from intubation to extubation? *Respir. Care*. 2007; 52 (4): 423–438.
14. Tusman G., Bohm, S.H., Suarez Sipmann F., Maisch S. Lung recruitment improves the efficiency of ventilation and gas exchange during one-lung ventilation anesthesia. *Anesth. Analg.* 2004; 98 (6): 1604–1609.
15. Gustafsson P.M., Ljungberg H.K., Kjellman B. Peripheral airway involvement in asthma assessed by single-breath SF₆ and He washout. *Eur. Respir. J.* 2003; 21 (6): 1033–1039.
16. Arnold J.H., Stenz R.I., Grenier B., Thompson J.E. Singlebreath CO₂ analysis as a predictor of lung volume change in a model of acute lung injury. *Crit. Care Med*. 2000; 28 (3): 760–764.
17. Kline J.A., Israel E.G., Michelson E.A. et al. Diagnostic accuracy of a bedside D-dimer assay and alveolar deadspace measurement for rapid exclusion of pulmonary embolism. *JAMA*. 2001; 285 (6): 761–768.
18. Verschuren F., Heinonen E., Clause D. et al. Volumetric capnography as a bedside monitoring of thrombolysis in major pulmonary embolism. *Intensive Care Med*. 2004; 30 (11): 2129–2132. DOI: 10.1007/s00134-004-2444-9.
19. Moreira M.M., Terzi R.G., Carvalho C.H. et al. Alveolar dead space and capnographic variables before and after thrombolysis in patients with acute pulmonary embolism. *Vasc. Health Risk Manag.* 2009; 5 (1): 9–12.
20. Moreira M.M., Terzi R.G., Paschoal I.A. et al. Thrombolysis in massive pulmonary embolism based on the volumetric capnography. *Arq. Bras. Cardiol.* 2010; 95 (4): e97–e99.
21. Romero P.V., Lucangelo U., Lopez Aguilar J. et al. Physiologically based indices of volumetric capnography in patients receiving mechanical ventilation. *Eur. Respir. J.* 1997; 10: 1309–1315.
22. Koulouris N.G., Latsi P., Stavrou E. et al. Unevenness of ventilation assessed by the expired CO₂ gas volume versus V(T) curve in asthmatic patients. *Respir. Physiol. Neurobiol.* 2004; 140 (3): 293–300. DOI: 10.1016/j.resp.2004.01.005.
23. Almeida C.C., Almeida-Júnior A.A., Ribeiro M.Á. et al. Volumetric capnography to detect ventilation inhomogeneity in children and adolescents with controlled persistent asthma. *J. Pediatr. (Rio J)*. 2011; 87 (2): 163–168.
24. Kars A.H., Goorden G., Stijnen T. et al. Does phase II of the expiratory PCO₂ versus volume curve have diagnostic value in emphysema patients? *Eur. Respir. J.* 1995; 8 (1): 86–92.
25. Romero P.V., Rodriguez B., de Oliveira D. et al. Volumetric capnography and chronic obstructive pulmonary disease staging. *Int. J. COPD*. 2007; 2 (3): 381–391.
26. Qi G.S., Gu W.C., Yang W.L. et al. The ability of volumetric capnography to distinguish between chronic obstructive pulmonary disease patients and normal subjects. *Lung*. 2014; 192 (5): 661–668. DOI:10.1007/s00408-014-9615-4.
27. Ribeiro M.Á., Silva M.T., Ribeiro J.D. et al. Volumetric capnography as a tool to detect early peripheral lung obstruction in cystic fibrosis patients. *J. Pediatr. (Rio J)*. 2012; 88 (6): 509–517. DOI: 10.2223/JPED.2233.
28. Ponomareva I.B., and Subbotin S.V. Abilities of volumetric capnography to measure lung function in patients with COPD. *Nauka molodykh (Eruditio Juvenium)*. 2016; 1: 67–73 (in Russian).
29. Abrosimov V.N., and Ponomareva I.B. Abilities of volumetric capnography to define COPD phenotype. In: *Dyspnea and dyspnea-associated syndromes. Collected scientific papers. Ryazan'*; 2014: 126–130 (in Russian).
30. Dutrieue B., Vanholsbeeck F., Verbank S., Paiva M.A. Human acinar structure for simulation of realistic alveolar plateau slopes. *J. Appl. Physiol.* 2000; 89 (5): 1859–1867.
31. Ream R.S., Screiner M.S., Neff J.D. et al. Volumetric capnography in children. Influence of growth on the alveolar plateau slope. *Anesthesiology*. 1995; 82 (1): 64–73.
32. Stenz R.I., Grenier B.T., Thompson J.E., Arnold J.H. Single breath CO₂ analysis as a predictor of lung volume in a healthy animal model during controlled ventilation. *Crit. Care Med*. 1998; 26 (8): 1409–1413.
33. Olsson K., Greiff L., Karlefors F. et al. Changes in airway dead space in response to methacholine provocation in normal subjects. *Clin. Physiol.* 1999; 19 (5): 426–432.

Received June 17, 2016