

Объемная капнография как способ оценки эффективности альвеолярной вентиляции в клинической практике

П. Торок^{1,2,3}, Ф. Депта¹, В. Дониц^{3,4}, М. Носаль¹, Ш. Имреч¹, Я. Беньова¹, К. Галкова⁵, М. Пауликова^{1,6}, М. Берешик^{1,7}, М. Янкайова^{2,3}, М. Паулины^{1,8}

Восточно-Словацкий институт кардиоваскулярных болезней

¹ Клиника анестезиологии и интенсивной медицины,

² Клиника кардиологии,

Словакия, 040 11, г. Кошице, ул. Ондавска, д. 8

Университет Сафарика

³ Медицинский факультет,

⁴ Институт физиологии человека, медицина сна,

Словакия, 040 11, г. Кошице, ул. SNP, д. 1

⁵ Университет Константина Философа

Факультет социальных наук и здравоохранения,

Словакия, г. Нитра, ул. Краскова, д. 1

⁶ Восточно-Словацкий онкологический институт

Словакия, г. Кошице, ул. Растиславова, д. 43

⁷ Католический университет,

Военная больница, клиника анестезии и интенсивной медицины

Словакия, г. Ружомберок, ул. Грабовская, д. 1

⁸ Словацкий университет здоровья, Госпиталь Дерера,

Словакия, г. Братислава, ул. Лимбова, д. 1

Volumetric Capnography As a Tool for Evaluation of Alveolar Ventilation Effectiveness in Clinical Practice

Pavol Török^{1,2,3}, Filip Depta¹, Viliam Donič^{3,4}, Martin Nosál¹, Štefan Imrecze¹, Janka Beňová¹, Katarína Galková⁵, Monika Paulíková^{1,6}, Marián Berešík^{1,7}, Monika Jankajová^{2,3}, Matúš Paulíny^{1,8}

East Slovakian Institute of Cardiovascular Diseases,

¹ Clinic of Anaesthesiology and Intensive Medicine,

² Clinic of cardiology,

8 Ondavská Str., 040 11 Košice, Slovakia

Safarik University,

³ Faculty of Medicine

⁴ Institute of Human Physiology, Sleep medicine

1 SNP Str., Košice, Slovakia

⁵ Faculty of Social Sciences and Health Care,

Constantine Philosopher University,

1 Kraskova Str., Nitra, Slovakia

⁶ East Slovakian Oncological institute,

43 Rastislavova Str., Košice, Slovakia

⁷ Catholic university,

Military hospital, Clinic of anaesthesia and intensive medicine,

1 Hrabovská Str., Ružomberok, Slovakia

⁸ Slovak health university, Déer's Hospital,

1 Limbová Str., Bratislava, Slovakia

Цель исследования — сравнить взаимосвязь между объемом мертвого пространства и дыхательным объемом (VD/VT) методом объемной капнографии (VCap) в режимах искусственной вентиляции легких с управляемым давлением (PCV) и поддержкой давлением (PSV) в послеоперационном периоде.

Материалы и методы. В обсервационное, проспективное исследование методом случайного выбора включили 30 пациентов из отделения сердечно-сосудистой хирургии, перенесших операцию аортокоронарного шунтирования (АКШ) с экстракорпоральным кровообращением. Пациентов подключали к системе вентиляции легких сразу при поступлении в отделение интенсивной терапии. Затем проводили мониторинг VD/VT, продукции CO₂ (VECO₂), а также параметров вентиляции. Параметры вентиляции в режимах с управляемым давлением (PCV) и поддержкой давлением (PSV) статистически оценивали по *t*-критерию.

Адресс для корреспонденции:

Павол Торок
E-mail: torokp@t-zones.sk

Correspondence to:

Pavol Török
E-mail: torokp@t-zones.sk

Результаты. Не выявили достоверных различий концентрации CO_2 во выдыхаемом воздухе (ETCO_2) между режимами PCV и PSV ($p=\text{NS}$), хотя как VECO_2 , так и минутная вентиляция (MV) возрастали в режиме PSV ($p<0,01$). Отношение VD/VT в режиме PSV было ниже, чем в режиме PCV. Газообмен, представленный альвеолярной вентиляцией (VA), был лучше в режиме PSV ($p<0,01$). Показатель VA был также выше в режиме PSV ($p<0,05$). Расчетное отношение VD/VT различалось между режимами PCV и PSV ($p<0,01$).

Заключение. Объемная капнография (VCap) является средством мониторинга эффективности обмена CO_2 . Отмечали снижение VD/VT с улучшением альвеолярной вентиляции (VA) в режиме PSV. VCap представляется подходящим методом регулирования протективной вентиляции легких.

Ключевые слова: ИВЛ, объемная капнография (VCap), вентиляция с управляемым давлением (PCV), вентиляция с контролем давления (PSV)

The purpose of the study was to compare the relationship between the dead space volume and tidal volume (VD/VT) using volumetric capnography (VCap) during pressure controlled (PCV) and pressure supported (PSV) ventilation mode in the postoperative period.

Materials and methods. 30 randomly assigned cardiac surgical patients undergoing CABG (coronary artery bypass grafting) using ECC (extracorporeal circuit) were included in an observational, prospective study. Patients were connected to the ventilator immediately after ICU admission. After that, monitoring VD/VT , CO_2 production (VECO_2) as well as ventilation parameters was carried out. The parameters during PCV and PSV mode were statistically evaluated using *t*-test.

Results. Expiratory CO_2 (ETCO_2) concentration were not significantly different in both PCV or PSV ($p=\text{NS}$), although both VECO_2 and minute ventilation (MV) increased during PSV mode ($p<0.01$). VD/VT in PSV mode was lower than in PCV. Gas exchange represented by alveolar ventilation (VA) was better during PSV ($p<0.01$). VA was also higher during PSV ($p<0.05$). The calculated VD/VT ratio differed between PCV and PSV mode ($p<0.01$).

Conclusion. VCap represents a tool for monitoring of CO_2 exchange effectiveness. We registered a decrease in VD/VT with improved alveolar ventilation (VA) in PSV mode. VCap seems to be a suitable instrument for adjustment of protective lung ventilation.

Keywords: MV, volumetric capnography (VCap); pressure controlled ventilation; pressure supported ventilation

DOI:10.15360/1813-9779-2018-5-16-24

Введение

Альвеолярная вентиляция описывает периодический процесс вдоха воздуха из атмосферы в легкие и его выдоха, соответственно, из легких в атмосферу. Газообмен между атмосферой и легкими характеризуется следующими параметрами:

- минутной вентиляцией (MV);
- дыхательным объемом (VT);
- вентиляцией мертвого пространства (анатомического и альвеолярного (VDaw , VDalv));
- альвеолярной вентиляцией (VA);
- частотой дыхания (*f*).

Лишь объем воздуха, достигший альвеол, важен для газообмена, поскольку лишь альвеолы участвует в нем [1–4]. На объем анатомического мертвого пространства (VDaw) (включая верхние и нижние дыхательные пути вплоть до дыхательных бронхиол) и физиологического мертвого пространства (VDf) (альвеолярного и анатомического) влияет процент воздуха, вдыхаемого за один вдох (VT), доставляемого в альвеолы (например, $(\text{VDf} + \text{VDaw})/\text{VT} = \text{VD}/\text{VT}$) [4, 5].

Чем больше объем мертвого пространства, тем меньше воздуха доступно для газообмена в альвеолах. Данный механизм снижает эффективность искусственной вентиляции легких (ИВЛ). Термин «мертвое пространство» (анатомическое) как часть

Introduction

Alveolar ventilation describes the repeating process of air inspiration and expiration to and from the lungs into the atmosphere, respectively. Gas exchange between the atmosphere and lungs is characterized by the following parameters:

- Minute ventilation (MV)
- Tidal volume (VT)
- Dead space ventilation (anatomical and alveolar (VDaw , VDalv))
- Alveolar ventilation (VA)
- Respiratory frequency (*f*)

Only the volume of air reaching the alveoli is important for gas exchange, because only alveolar segment is involved in the gas exchange [1–4]. The volume of anatomical dead space (VDaw) (including upper and lower respiratory airways up to respiratory bronchioles) and the functional dead space (VDf) (alveolar and anatomical) is influenced by percentage of air inhaled during one breath (VT) that is delivered to alveoli (e.g. $(\text{VDf} + \text{VDaw})/\text{VT} = \text{VD}/\text{VT}$) [4, 5].

The bigger the dead space, the less amount of air will be available for gas exchange in alveoli. This mechanism decreases the effectiveness of the mechanical lung ventilation (MV). The term «dead space» (anatomical) as a part of the respiratory space is not useless or harmful for respiration, it merely describes

дыхательного пространства не означает его вреда или бесполезности для дыхания, он лишь отражает тот факт, что воздух в его пределах не участвует в газообмене. Оно выполняет другие важные функции [3, 6–8]. Нормальное значение VD/VT в положении стоя у взрослых составляет примерно 0,3. В положении лежа на спине данное значение несколько возрастает и находится в пределах 0,33–0,35.

При заданном постоянном объеме мертвого пространства (V_{daw}) альвеолярная вентиляция может значительно различаться при изменении частоты и амплитуды дыхания, тогда как минутная вентиляция легких остается неизменной [4, 5]. Сложность измерения объемов альвеолярного и анатомического мертвого пространств представляло проблему, не позволяющую широко использовать эти данные в клинической практике [9, 10]. Однако, использование так называемой объемной капнографии (V_{Cap}) и лучшее понимание ее клинического значения помогли преодолеть ограничения, связанные с оценкой потока CO_2 и объема мертвого пространства [11, 12]. В настоящее время объем мертвого пространства можно измерить у постели больного. Данный вид мониторинга становится методом оценки эффективности вентиляции, применяемым для настройки системы вентиляции, а также средством принятия решений и оценки показателей гемодинамики в отделениях интенсивной терапии [13, 14].

Объемная капнография (V_{Cap}) — метод измерения кинетики CO_2 за один выдох. Анализ объемов капнограммы дает широкую физиологическую информацию об образовании CO_2 в процессе обмена, его транспортировке, элиминации, отчасти о циркуляции, а также позволяет оценить изменение различных объемов в легких с течением времени [15–17].

Объемная капнография (V_{Cap}) — лучший способ измерения объема мертвого пространства (V_{Daw} и V_{df}) в клинической практике, позволяющий проводить подробный анализ функциональных компонентов в каждом дыхательном объеме (VT). На рис. 1 показан пример мониторинга различных функциональных объемов легких.

Цель исследования — сравнение взаимосвязи между объемом мертвого пространства и дыхательным объемом (VD/VT) методом объемной капнографии (V_{Cap}) в режимах искусственной вентиляции легких с управляемым давлением (PCV) и поддержкой давлением (PSV) в послеоперационном периоде.

Материал и методы

Использовали аппарат ИВЛ с системой автоматического управления (Auga-V Chigana Ltd., Словакия), содержащий встроенный модуль объемной капнографии (V_{Cap}), который позволяет отслеживать образование CO_2 ($VECO_2$), объем CO_2 за один выдох (VT_{CO_2}), а также отношение VD/VT с помощью V_{Cap} . При ведении пациента, находящегося под анестезией, а также в послеоперационном периоде мы используем строгий протокол

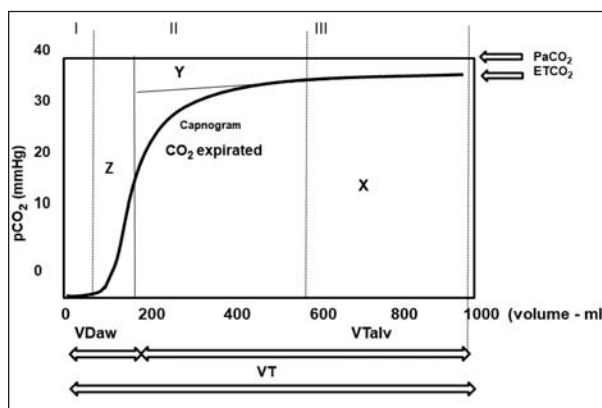


Рис. 1. Мониторинг различных функциональных объемов легких.

Fig.1. Monitoring of different functional lung volumes.

Note. V_{daw} — the volume of the anatomical dead space; VT — tidal volume; V_{Talv} — alveolar tidal volume; $EtCO_2$ — concentration of carbon dioxide (CO_2) at the end of an exhaled breath; CO_2Exp — the volume of exhaled CO_2 (capnogram); $PaCO_2$ — partial pressure of CO_2 in arterial blood; PCO_2 — partial pressure of CO_2 ; Phase I of the capnogram; phase II of the capnogram; phase III of the capnogram; z — the specified part of the anatomical dead space; x — the specified part of the volume exhaled from the alveolar space; y — part of the alveolar dead space.

Примечание. V_{daw} — объем анатомического мертвого пространства; VT — дыхательный объем; V_{Talv} — альвеолярный дыхательный объем; $EtCO_2$ — объем CO_2 в конце выдоха; CO_2Exp — объем выдыхаемого CO_2 (капнограмма); $PaCO_2$ — парциальное давление CO_2 в артериальной крови; PCO_2 — парциальное давление CO_2 . I фаза капнограммы; II фаза капнограммы; III фаза капнограммы; z — указанная часть анатомического мертвого пространства; x — указанная часть объема, выдыхаемого из альвеолярного пространства; y — часть альвеолярного мертвого пространства.

the fact that air inside the dead space does not participate in the gas exchange. It has other important functions [3, 6–8]. The normal VD/VT value in upright position is approximately 0.3 in adults. In the supine position, this value slightly increases and ranges between 0.33–0.35.

In constant dead space volume given (V_{Daw}), alveolar ventilation could vary significantly with changing frequency and amplitude, while minute ventilation will remain constant [4, 5]. Measurements of alveolar and anatomical dead space volumes were problematic that prevented from using them in clinical practice [9, 10] However, recent achievements in so-called volumetric capnography (V_{Cap}) and better understanding of its clinical impact helped in overcoming restrictions related to the CO_2 flow and the dead space [11, 12]. At present, we are able to measure the dead space at the bedside. This monitoring tool becomes a tool for decision-making as a method for assessment of the ventilation efficiency used for adjustment of ventilator settings as well as hemodynamic evaluation tool in intensive care units [13, 14].

Volumetric capnography (V_{Cap}) is a method for the measurement of CO_2 kinetics during one breath (in expiration). Capnogram volume analysis provides wide

Таблица 1. Демографические данные.
Table 1. Demographic parameters.

Parameters	Average±SD
Weight, kg	79±13
Height, cm	166±7
Age, year	63±10
BMI (body mass index)	28±3
IBV (ideal body weight)	74±8
VDcalc 2 ml/kg IBV	147±16
LIS (lung injury score)	0.5±0.25
Men/Women	18/12

Примечание. Для табл. 1–3 и рис. 1–4: Parameter(s) — параметр(ы); SD — стандартное отклонение. Для табл. 1, 2: Average — среднее; Weight — вес; Height — рост; Age, year — возраст, лет; BMI — индекс массы тела; IBV — идеальный вес тела; LIS — баллы по шкале повреждения легких; Men/Women — муж-чин/женщин.

протективной вентиляции легких с целью достижения минимально возможного пикового давления ($P_{aw} < 25$ см H_2O) (давление в режиме управляемого давления (Ppc), давление в режиме поддержки давлением (Pps), удельный дыхательный объем (VT_{spec} в мл/кг) — $VTs \geq 6,0 \pm 0,5$ мг/кг для идеальной массы тела (ИМТ). Положительное давление в конце выдоха (PEEP) задавали в пределах 0,8 — 1,1 см H_2O /10 кг ИМТ (не ниже 5 см H_2O), концентрацию вдыхаемого кислорода (FiO_2) постепенно доводили до достижения SpO_2 не менее 93% (как правило, $FiO_2 = 0,4 \pm 0,05$). Результаты сравнивали с теоретической и математической моделью, полученной на основе демографических данных наших пациентов.

В исследование последовательно и методом случайного выбора включили 30 пациентов из отделения сердечно-сосудистой хирургии, перенесших операцию аортокоронарного шунтирования (АКШ) с искусственным кровообращением (ИК). Операции проводили в период с 15.11.2017 г. по 31.01.2018 г. Критериями исключения были ФВЛЖ $< 30\%$, ХОБЛ III и IV ст. (Gold), бронхиальная астма, наличие хронической почечной недостаточности, требующей гемодиализа, и повреждение легких средней тяжести (более 0,75 баллов по шкале LIS). Расчетное значение VD_{aw} в нашей группе пациентов составило 147 мл. Демографические данные приведены в табл. 1.

После достижения стабильного состояния при вентиляции легких в режиме управляемого давления (PCV) или поддержки давлением (PSV) измеряли основные параметры вентиляции, а также, методом объемной капнографии (VCap), — параметры газообмена, $VECO_2$ и VD/VT . Легкую седацию пациентов осуществляли путем введения раствора 1% пропофола (по Ричмондской шкале седации-ажитации RASS-2-0). В течение первых 30–35 минут у пациентов не было признаков самостоятельной дыхательной активности вследствие остаточной анестезии, релаксации и седации.

Основная настройка аппарата ИВЛ была исключительно протективной. При возобновлении у пациентов самостоятельной дыхательной активности использовали поддержку давлением (поточный триггер = 1 л/мин, давление поддержки (Pps) задавали в пределах VT_{spec} 5,1–6,1 мл/кг ИМТ).

Делали акцент на сравнение изменений параметров искусственной вентиляции легких, в основном по значению VD/VT , измеренного методом капнографии (VCap), а также $ETCO_2$ и $VECO_2$ в процессе управляе-

physiologic information regarding metabolic production of CO_2 , its transport, elimination and partially information about its circulation; it also permits to assess changes in different lungs volumes with time [15–17].

Volumetric capnography (Vcap) is the best clinical tool for dead space (VD_{aw} and VD_f) measurement allowing detailed analysis of functional components in each tidal volume (VT). Fig. 1 presents monitoring of different functional lung volumes.

The purpose of the study was to compare the relationship between the dead space volume and tidal volume (VD/VT) by using volumetric capnography (VCap) during pressure controlled (PCV) and pressure supported (PSV) ventilation mode in the postoperative period.

Materials and Methods

We used a ventilator (Aura V—Chirana Ltd.SK, Slovakia) that contains integrated volumetric capnography (VCap) and up to now we are able to monitor CO_2 production ($VECO_2$), CO_2 volume in one breath (VT_{CO_2}), as well as VD/VT using VCap. While managing a patient during anesthesia and also postoperatively, we use a strict protocol for protective lung ventilation aiming at the smallest peak pressure possible ($P_{aw} < 25$ cm H_2O) (Pressure of pressure control (Ppc), pressure of pressure support (Pps), specific tidal volume (VT_{spec} in ml/kg) $VTs \leq 6.0 \pm 0.5$ ml/kg for the ideal body weight (IBV). Positive end expiratory pressure (PEEP) is set for 0.8–1.1 cm H_2O /10kg IBV, (not lower than 5 cm H_2O) and we titrate inspiratory oxygen concentration (FiO_2) to obtain saturation of O_2 (SpO_2) of at least 93% (usually $FiO_2 = 0.4 \pm 0.05$). We compared these results with theoretical and mathematical model that we obtained from demographic data in our patients.

We randomly included 30 consecutive cardiac surgical patients undergoing CABG surgery using extracorporeal circulation (ECC). Surgical procedures were performed over the period from 15.11.2017 to 31.1.2018. Exclusion criteria were LVEF $< 30\%$, COPD III and IV (Gold), bronchial asthma, CRF patients requiring hemodialysis and patients with lung injury score (LIS) of more than 0.75 (moderate lung injury). The calculated VD_{aw} was 147 ml in our patients group. Demographic data are presented in Table 1.

When the steady state was reached in pressure controlled (PCV) or pressure support (PS) ventilation modes, we measured basic ventilation parameters and gas exchange parameters, $VECO_2$ and VD/VT using VCap. Patients were slightly sedated using 1% propofol administration (Richmond Agitation-Sedation Scale RASS-2-0). During the first 30–35 minutes, patients had no spontaneous respiratory activity as a result of residual anesthesia, relaxation and sedation.

Basic ventilator setting was strictly protective. When patients resumed spontaneous respiratory activity, pressure support was used (flow trigger = 1 l/min, Pressure of pressure support (Pps) was set to obtain VT_{spec} ranging from 5.1–6.1 ml/kg IBV).

We focused on comparing changes in mechanical ventilation but mainly on VD/VT measured using VCap as well as $ETCO_2$ and $VECO_2$ during controlled and spontaneous (supported) ventilation. Measurement was done 15 minutes after the parameters were stable in the pressure controlled ventilation (PCV) mode and we averaged the results. The duration

мой и самостоятельной (поддерживаемой) вентиляции. Измерения проводили через 15 минут после стабилизации параметров в режиме вентиляции с управляемым давлением (PCV), результаты усредняли. Длительность измерения параметров составляла 15 минут. После восстановления самостоятельной вентиляции те же измерения повторяли в течение 15 минут в режиме вентиляции с поддержкой давлением (PSV). Данные, полученные в режимах PCV и PSV, сравнивали (70±10 минут после поступления из операционной) по *t*-критерию. Фактические данные, полученные при измерении VD/VT, сравнивали с данными математической модели.

Данное наблюдательное исследование было утверждено Этическим комитетом Восточно-Словацкого института сердечно-сосудистых болезней (VBSCH a.s.), Кошице, и зарегистрировано за номером 15/11/2017 (председатель комитета – доктор медицины Станислав Юхас (Stanislav Juhás)).

Результаты и обсуждение

Сравнивали именно параметры вентиляции легких, а также параметры кинетики обмена CO₂ между режимами управляемого и поддерживаемого давления методом объемной капнографии (VCap). В расчетной математической модели представлены теоретические значения. Результаты приведены на рис. 1–4 и в табл. 2, 3.

Измеренные и заданные параметры аппарата ИВЛ представлены в табл. 2.

Сравнили удельный дыхательный объем в мл/кг (VTspec) и частоту дыхания (*f*) в обеих группах пациентов и обнаружили, что только частота дыхания достоверно различалась между режимами PCV и PSV (*p*<0,05), VTspec (*p*=NS). Очевидно, что математически рассчитанные значения были постоянными, хотя и отличались от измеренных значений (*p*<0,01) (рис. 1).

Сравнили также средние значения ETCO₂ в режимах вентиляции PCV и PSV, но не обнаружили достоверных различий (*p*=NS) (рис. 2).

Сравнили параметр образования CO₂ в минуту (IVECO₂) и обнаружили его достоверное различие при режимах PCV и PSV (*p*<0,01). Отметим повышенное образование CO₂ в режиме поддержки давлением (PSV) при наличии некоего триггера для пациента и прекращении действия остаточной анестезии (рис. 3).

Сравнили значения VD/VT, измеренные методом VCap, в режимах PCV и PSV и выявили их достоверные различия (*p*<0,01) (рис. 4).

Отметили статистически достоверное различие в значениях VCap (*p*<0,01) и VA (*p*<0,05) при вентиляции с управляемым давлением (PCV) по сравнению с режимом поддержки давлением (PSV). Значения VD/VT, измеренные методом VCap, а также расчетные показатели альвеолярной вентиляции VA в режимах PCV и PSV показаны в табл. 3.

Представленные результаты позволяют предположить, что протективная вентиляция легких с

Таблица 2. Измеренные и заданные параметры аппарата ИВЛ.

Table 2. Measured and set ventilator parameters.

Parameters	Average±SD
<i>f</i> (breath/min) mathematical model	17±0
<i>f</i> (breath/min) controlled ventilation	19±1.5
<i>f</i> (breath /min) ventilatory support	19±2.4
VT (ml) mathematical model	433±48
VT (ml) controlled ventilation	378±56
VT (ml) ventilatory support	400±68
MV (l/min) mathematical model	7±0.8
MV (l/min) controlled ventilation	7±1.2
MV (l/min) ventilatory support	8±1.2
VT spec (ml/kg) mathematical model	5.8±0.3
VT spec (ml/kg) controlled ventilation	5.1±0.4
VT spec (ml/kg) ventilatory support	5.4±0.7
IVECO ₂ c (ml/min/m ²) controlled ventilation	102±25
IVECO ₂ s (ml/min/m ²) ventilatory support	109±26
PEEP (cm H ₂ O) cca 1 cm H ₂ O/10 kg	7±1
FiO ₂	0.4±0.05
Paw max (cm H ₂ O)	< 20

Примечание. Breath/min – дыханий в мин. Для табл. 2, 3: mathematical model – математическая модель; controlled ventilation – режим вентиляции с управляемым давлением; ventilatory support – режим вентиляции с поддерживаемым давлением.

Таблица 3. Значения VD/VT, измеренные методом VCap, и расчетные показатели альвеолярной вентиляции VA в режимах PCV и PSV.

Table 3. VD/VT values measured using VCap as well as calculated alveolar ventilation VA parameters in PCV and PSV ventilation modes.

Parameters	Value	± SD	<i>P</i>
VD calc/VT mathematical model	0.34	0.000	–
VCap VD/VT controlled ventilation	0.43	0.032	
VCap VD/VT ventilatory support	0.39	0.028	<0.01
VA calc (l/min) mathematical model	4.90	0.79	–
VA (l/min) controlled ventilation	4.25	0.69	
VA (l/min) ventilatory support	4.60	0.72	<0.05

Примечание. Value – значение.

of the measurement was 15 minutes. After recovery of spontaneous ventilation, we repeated the same measurement over 15 minutes in the pressure support ventilation mode (PSV). We compared our data obtained from PCV with data obtained in the PSV mode (70±10 minutes after admission from the operating theatre) using *t*-test. We compared actual measured VD/VT data with data obtained using a mathematical model.

Our observation trial was approved by ethical committee of the East Slovakian Institute of Cardiovascular Diseases in Košice registered under No. 15/11/2017, with Dr. Stanislav Juhás being head of the committee.

Results and Discussion

We compared lung ventilation parameters as well as kinetic parameters of CO₂ exchange between controlled ventilation and support ventilation mode using VCap. The calculated mathematical model represents the theoretical value. The results are presented in tables 2, 3 and figures 1–4 below.

Measured and set ventilator parameters are presented in table 2.

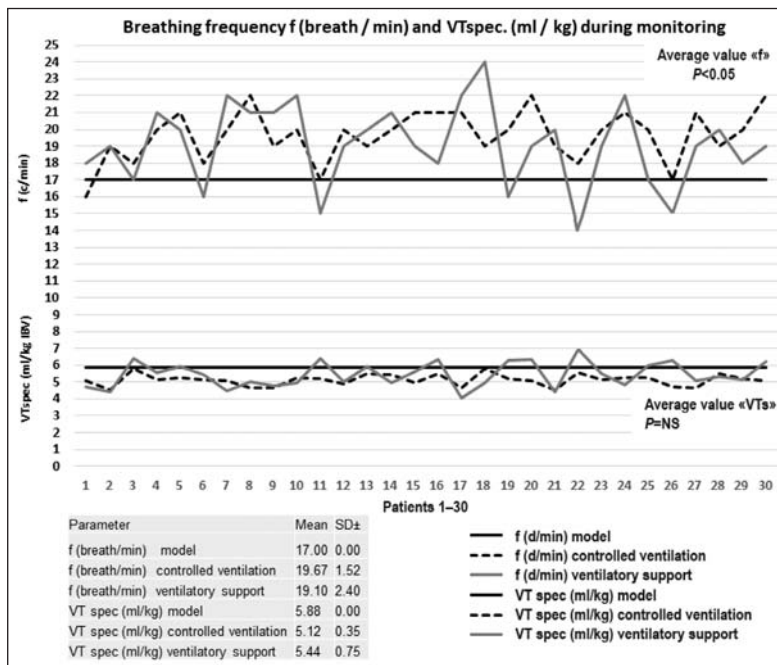


Рис.1. Сравнение частоты дыхания и VTspec между режимами вентиляции с управляемым и поддерживаемым давлением.

Fig. 1. Comparison of breathing frequency and VTspec between controlled ventilation and ventilatory support mode.

Примечание. Для рис. 1–4: Patients — пациенты; Mean — значение.

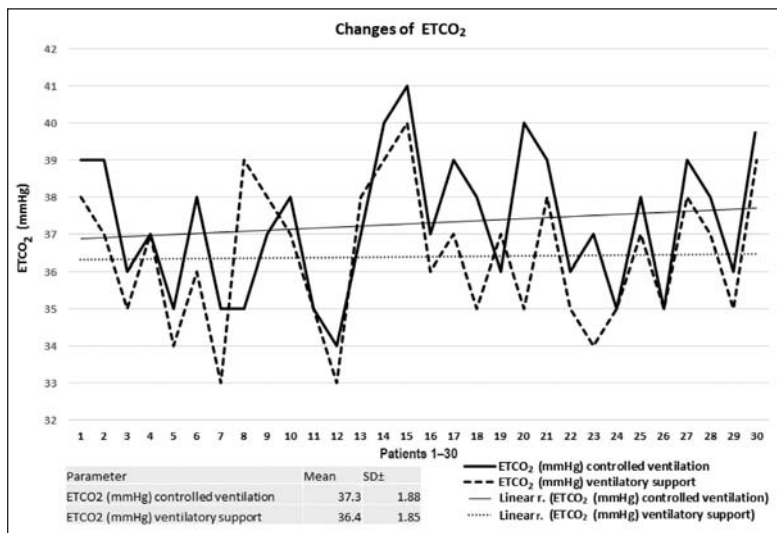


Рис. 2. Изменения CO₂ в конце выдоха (ETCO₂) при вентиляции в режимах с управляемым и поддерживаемым давлением.

Fig. 2. Changes of end tidal CO₂ (ETCO₂) between controlled ventilation and ventilatory support mode.

низкими дыхательными объемами вызывает повышение значения VD/VT, что считается нормальным. Выявили статистически достоверное различие по значениям VD/VT между режимами PCV и PSV. Объем мертвого пространства VD/VT больше при режиме PCV, чем при PSV. При этом, как показано в табл. 3, в режиме PSV возрастала альвеолярная вентиляция, а также повышалось образование CO₂.

We compared the specific tidal volume in ml/kg (VTspec) and respiratory frequency (f) in both patient groups, and we found that only respiratory frequency differed significantly between PCV and PSV ($p<0.05$), VTspec ($p=NS$). It is obvious that mathematically calculated values were constant, although different from measured values ($p<0.01$) (Fig. 1).

We compared average ETCO₂ values in PCV and PSV ventilation mode, but these did not show significant difference ($p=NS$) (Fig. 2).

We compared the specified parameter of CO₂ production per minute (IVECO₂) and found, that the values were significantly different between PCV and PSV ($p<0.01$) (Fig. 3). There was an increased CO₂ production during PSV with a certain trigger for a patient as well as discontinuation of residual anesthesia.

We compared VD/VT measured using VCap during PCV and PSV, the results were significantly different ($P<0.01$) (Fig. 4).

There was a statistically significant difference of VCap value ($P<0.01$) as well as VA values ($P<0.05$) in PVC vs. PSV ventilation mode. Changes in the VD/VT values measured using VCap as well as calculated alveolar ventilation VA parameters in PCV and PSV ventilation modes are presented in Table 3.

Comparison of VD/VT and VA during controlled ventilation and ventilator support using VCap.

The calculated values of VD calc/VT and VAcac obtained from the mathematical model are presented.

The presented results suggest that the protective lung ventilation with low tidal volumes caused increased VD/VT values, which is considered normal. There is a statistical difference between VD/VT values in PCV vs. PSV. The dead space VD/VT is greater in the PCV mode than that in the PSV mode. At that, there was increased alveolar ventilation, but also increased CO₂ production during PSV as it is shown in Table 3.

Alveolar ventilation is ventilation taking place in the alveolar segment which is responsible for gas exchange [1, 2]. Changes in tidal volume (VT) and frequency with unchanged alveolar dead space (VDaw) caused changes in alveolar ventilation. A higher res-

Альвеолярная вентиляция — вентиляция, происходящая в альвеолярном отделе, «ответственном» за газообмен [1, 2]. Изменения дыхательного объема (VT) и частоты дыхания при неизменном объеме альвеолярного мертвого пространства (VDaw) приводили к изменениям в альвеолярной вентиляции. Повышение частоты дыхания и уменьшение дыхательного объема (VT) вызывали уменьшение альвеолярной вентиляции (VA) [1, 4, 15] $VA = (VT - (VDaw + VD_{alv})) \cdot f$. Без данных мониторинга кинетики CO₂ методом VCap мы оценивали объем мертвого пространства (VDaw) дыхательных путей примерно примерно в 2 мг/кг, не располагая, однако, данными об объеме альвеолярного мертвого пространства (VD_{alv}). Альвеолярную вентиляцию оценивали по анализу газов крови. VDaw представляет собой часть дыхательного объема, заполняющего проводящие дыхательные пути, не участвующего в газообмене в альвеолярном отделе [16–18]. VDaw играет важную роль в перемешивании, согревании, увлажнении и очистке вдыхаемого газа. С другой стороны, объем мертвого альвеолярного пространства (VD_{alv}) представляет собой часть мертвого объема альвеолярного отдела, имеющуюся при патологии и не принимающую участия в газообмене (например, при обструкции дыхательных путей, неоднородности распределения газов, нарушении капиллярного кровотока) [19, 20]. Физиологическое мертвое пространство (VD_f) является суммой объемов VD_{alv} и VDaw. Капнография сама по себе является ценным инструментом для оценки вентиляции и перфузии за счет измерения ETCO₂ и получения капнограммы [7, 21]. Можно измерить объем выделяемого CO₂ за один выдох (VT_{CO₂}) или образование CO₂ со временем (VECO₂). Капнограмма, регулярно оцениваемая в клинической практике, отражает сложные физиологические процессы, взаимодействующие и влияющие друг на друга. Анализ объемов CO₂ за один выдох (VT_{CO₂}) на капнограмме позволяет изучить некоторые из данных процессов и получить дополнительные представления об их патофизиологических механизмах [3, 4]. В качестве основного метода измерения функционально-

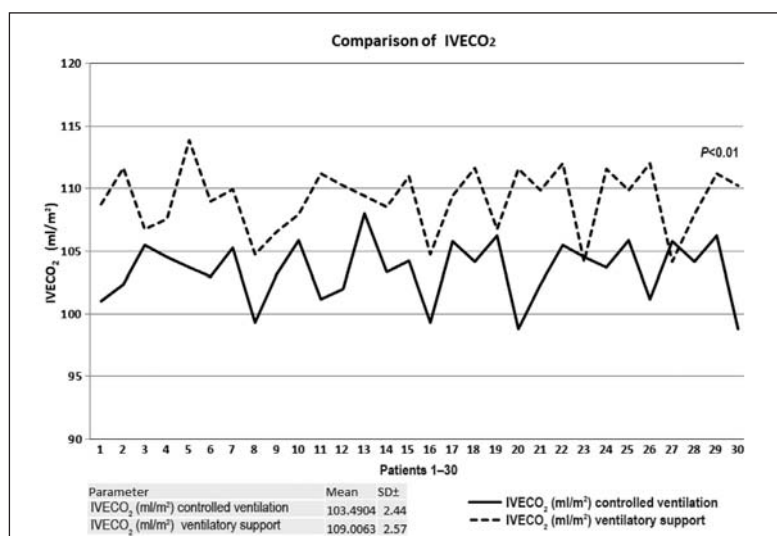


Рис. 3. Сравнение указанного параметра образования CO₂ (IVCO₂) между режимами вентиляции с управляемым и поддерживаемым давлением.

Fig. 3. Comparison of the specified parameter of CO₂ production (IVCO₂) between controlled ventilation and ventilatory support mode.

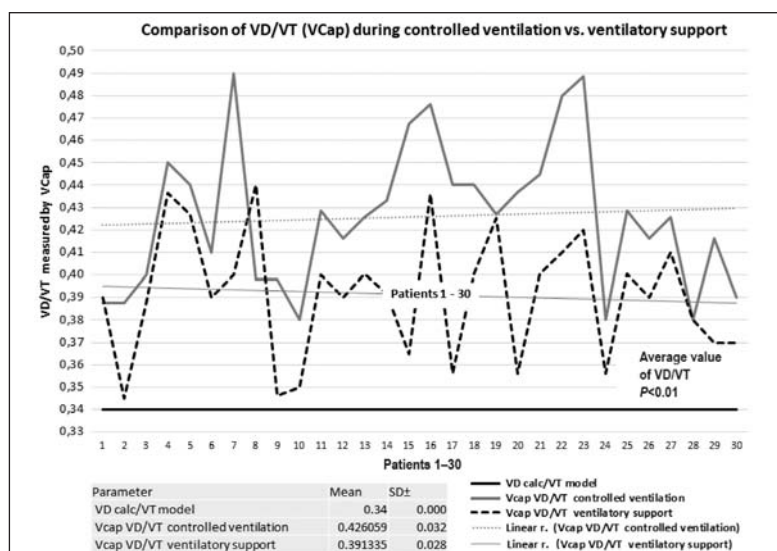


Рис. 4. Сравнение значения VD/VT, измеренного методом VCap, при вентиляции в режимах с управляемым и поддерживаемым давлением.

Fig. 4. Comparison of VD/VT measured by VCap between controlled ventilation and ventilatory support mode.

piratory frequency and lower tidal volume (VT) caused lower alveolar ventilation (VA) [1, 4, 15] $VA = (VT - (VDaw + VD_{alv})) \cdot f$. Without CO₂ kinetics monitoring by Vcap, we estimated airway dead space volume (VDaw) roughly to be 2 ml/kg. However, we have no information about alveolar dead space (VD_{alv}). We estimated the alveolar ventilation based on the blood gas test. VDaw is a part of tidal volume filling up the conductive airways and not participating in gas exchange in the alveolar segments [16–18]. VDaw plays important roles in mixing, warming, humidifying and purifying the inhaled gas. On the other hand, alveolar dead space (VD_{alv}) represents the part

го мертвого пространства используют объемную капнографию (V_{Cap}), поскольку метод основан на анализе концентрации CO₂ во выдыхаемом газе и его объеме. Для анализа V_{Cap} существуют необходимые условия, которые следует учитывать. Выдыхаемый газ не должен содержать CO₂ (просроченная натриевая известь может повлиять на достоверность результатов). Необходимо понимать, что каждая из миллионов альвеол имеет свое соотношение вентиляции и перфузии (V/Q) и какие бы то ни было изменения локального отношения V/Q соответствуют некоторому объему мертвого пространства. Отношение VD/VT, измеренное методом V_{Cap}, является весьма точным способом оценки вентиляции легких при стабильном образовании CO₂ и постоянной ИВЛ [10]. Изменения механики легочного дыхания, ведущие к изменению параметра VT_{CO₂} (ателектаз, коллапс, отек легкого и т.п.), с высокой чувствительностью определяются методом V_{Cap}. Состояние легких по изменениям положительного давления в конце выдоха (РЕЕР) также можно определить на основе VD/VT. CO₂ поступает в альвеолы посредством кровотока в легочных капиллярах, и показатель VT_{CO₂}, как и VD/VT, может служить индикатором нарушений гемодинамики (низкая легочная перфузия, эмболия сосудов легких и т.п.) [22, 23]. Полученные результаты указывают на то, что слабовыраженная легочная недостаточность (LIS = 0,5 баллов) и постоянное образование CO₂ (например, после операции на сердце) сопровождаются статистически достоверными изменениями VD/VT при вентиляции с поддержкой давлением (PSV). Отмечается уменьшение VD/VT и, следовательно, улучшение альвеолярной вентиляции после переключения режима вентиляции с управляемого давления на поддержку давления.

Заключение

Представленные данные подтверждают важность параметра V_{Cap}, практически не доступного для применения в клинической практике. Последние технические разработки позволили включить анализ V_{Cap} в конструкцию и программное обеспечение аппарата ИВЛ. После первого знакомства с методом V_{Cap} мы согласны с авторами, считающими данный метод хорошим способом выяснения кинетики элиминации CO₂. Метод не только позволяет оценить обмен и элиминацию CO₂, но и предоставляет ценные данные для настройки параметров аппарата ИВЛ и положительного давления в конце выдоха.

При вентиляции легких в режиме поддержки давлением PSV с триггером спонтанного дыхания можно видеть уменьшение отношения VD/VT и повышение выведения CO₂ из-за роста альвеолярной вентиляции. Представляется целесообразным использовать режимы вентиляции

of dead space in the alveolar segment, which is pathological and does not take part in gas exchange (e.g. airways obstruction, inhomogeneity of gas distribution or impaired capillary perfusion) [19, 20]. Functional dead space (VD_f) is a sum of VD_{alv} and VD_{aw}. Capnography itself provides valuable tool for evaluation of ventilation and perfusion by measuring ET_{CO₂} and by obtaining capnograms [7, 21]. We can measure the volume of eliminated CO₂ in one breath (VT_{CO₂}) or CO₂ production in time (VE_{CO₂}). A capnogram routinely assessed in clinical practice reflects complex physiological processes which interact with and affect each other. The CO₂ volume analysis of one breath (VT_{CO₂}) using a caprogram permits to analyze some of these processes and provides further data on pathophysiological mechanisms [3, 4]. V_{Cap} is used as a main tool for the functional dead space measurement, because it is based on CO₂ concentration analysis in exhaled gas and its volume. There are preconditions in V_{Cap} analysis, which need to be considered. Inspired gas must not contain any CO₂ (sodium lime after the expiry date can compromise the results). It is necessary to realize that any of millions of alveoli has its own ventilation perfusion (V/Q) ratio and any changes in local V/Q ratio represent a certain dead space volume. VD/VT measured by V_{Cap} represents very precise tool for lung ventilation assessment during stable CO₂ production and constant mechanical lung ventilation [10]. Changes in lung mechanics that make VT_{CO₂} changes (lung atelectasis, collapse, edema etc.) are detected by V_{Cap} with a high sensitivity. Lung condition based on changes in PEEP is also well-detected by VD/VT. CO₂ is brought into the alveoli by pulmonary capillary perfusion and VT_{CO₂} but also VD/VT could be an indicator of impaired hemodynamics (low pulmonary perfusion, embolism, etc.) [22, 23]. Our results point out to the fact that mild lung failure (LIS = 0.5 pts) and constant CO₂ production (e.g. after cardiac surgery) is accompanied with statistically significant changes in VD/VT in pressure support ventilation (PSV). There is a drop in VD/VT and therefore improvement in alveolar ventilation after switching from pressure controlled to pressure support ventilation.

Conclusion

The data presented confirm the importance of V_{Cap}, which was not available for the use in clinical practice. The recent technical achievements make it possible to include the V_{Cap} analysis into the ventilator hardware and software. After the first experiences with V_{Cap}, we agree with those authors who consider V_{Cap} a very good tool for assessment of CO₂ elimination kinetics. It is a tool for CO₂ exchange and elimination assessment, but also provides valuable information for adjustment of ventilator parameters and PEEP.

In the PSV mode with spontaneous respiration trigger, we can see a decreased VD/VT ratio and in-

легких с поддержкой давлением (PSV) во всех возможных случаях.

Метод объемной капнографии (VCap) представляется подходящим инструментом для настройки и оценки протективной вентиляции легких не только при легочных патофизиологических процессах.

References

- Čandík P., Rybár D., Sabol F., Kolesár A., Saladiak S., Imrecze Š., Beňová J., Galková K. Influence of ALV parameters during anaesthesia on mechanical energy absorbed by lungs. *Anesteziologie a Intenzivní Medicina*. 2016; 5 (2): 67-70. ISSN 1339-0155
- Tusman G., Sipmann F.S., Böhm S.H. Rationale of dead space measurement by volumetric capnography. *Anesth. Analg.* 2012; 114 (4): 866-874. DOI: 10.1213/ANE.0b013e318247f6cc. PMID: 22383673
- Tusman G., Gogniat E., Böhm S.H., Scandurra A., Suarez-Sipmann F., Torroba A., Casella F., Giannasi S., Roman E.S. Reference values for volumetric capnography-derived non-invasive parameters in healthy individuals. *J. Clin. Monit. Comput.* 2013; 27 (3): 281-288. DOI: 10.1007/s10877-013-9433-x. PMID: 23389294
- Bohr C. Ueber die Lungenathmung. *Acta Physiol.* 1891; 2 (1): 236-268. DOI: 10.1111/j.1748-1716.1891.tb00581.x
- Robertson H.T. Dead space: the physiology of wasted ventilation. *Eur. Respir. J.* 2015; 45 (6): 1704-1716. DOI: 10.1183/09031936.00137614. PMID: 25395032
- Fowler W.S. Lung function studies; the respiratory dead space. *Am. J. Physiol.* 1948; 154 (3): 405-416. DOI: 10.1152/ajplegacy.1948.154.3.405. PMID: 18101134
- Fletcher R., Jonson B., Cumming G., Brew J. The concept of deadspace with special reference to the single breath test for carbon dioxide. *Br. J. Anaesth.* 1981; 53 (1): 77-88. DOI: 10.1093/bja/53.1.77. PMID: 6779846
- Maisch S., Reissmann H., Fuehlekrug B., Weismann D., Rutkowski T., Tusman G., Böhm S.H. Compliance and dead space fraction indicate an optimal level of positive end-expiratory pressure after recruitment in anesthetized patients. *Anesth. Analg.* 2008; 106 (1): 175-181. DOI: 10.1213/01.ane.0000287684.74505.49. PMID: 18165575
- Tusman G., Böhm S.H., Suarez-Sipmann F. Dead space during one-lung ventilation. *Curr. Opin. Anaesthesiol.* 2015; 28 (1): 10-17. DOI: 10.1097/ACO.000000000000153. PMID: 25517622
- Hubble C.L., Gentile M.A., Tripp D.S., Craig D.M., Meliones J.N., Cheifetz I.M. Deadspace to tidal volume ratio predicts successful extubation in infants and children. *Crit. Care Med.* 2000; 28 (6): 2034-2040. DOI: 10.1097/00003246-200006000-00059. PMID: 10890660
- Sinha P., Soni N. Comparison of volumetric capnography and mixed expired gas methods to calculate physiological dead space in mechanically ventilated ICU patients. *Intensive Care Med.* 2012; 38 (10): 1712-1717. DOI: 10.1007/s00134-012-2670-5. PMID: 22893221
- Čandík P., Rybár D., Nosá M., Saladiak S., Imrecze Š., Beňová J., Galková K., Paulíková M. Volumetric capnography. *Anesteziologie a Intenzivní Medicina*. 2018; 29 (7). in press. ISSN: 1214-2158
- Doorduyn J., Nollet J.L., Vugts M.P., Roesthuis L.H., Akankan F., van der Hoeven J.G., van Hees H.W., Heunks L.M. Assessment of dead-space ventilation in patients with acute respiratory distress syndrome: a prospec-

tive observational study. *Crit. Care*. 2016; 20 (1): 121-128. DOI: 10.1186/s13054-016-1311-8. PMID: 27145818

creased CO₂ elimination because of increased alveolar ventilation. It seems reasonable to apply supported ventilation modes (PSV) anytime possible. We prefer slight sedation and good airway analgesia.

VCap seems to be a suitable instrument for adjustment of protective lung ventilation and assessment of not pulmonary pathophysiological processes alone.

- Siobal M.S., Ong H., Valdes J., Tang J. Calculation of physiologic dead space: comparison of ventilator volumetric capnography to measurements by metabolic analyzer and volumetric CO₂ monitor. *Respir. Care*. 2013; 58 (7): 1143-1151. DOI: 10.4187/respcare.02116. PMID: 23232740
- Čandík P., Drbjáková E., Lakatoš I., Toya P., Šalantay J. Comparison of efficacy of CPAP and high-frequency jet ventilation by the nasopharyngeal mask (VFDV-M) in the treatment of lung edema. *Anesteziologie a Intenzivní Medicina*. 2005; 16: 284-290. ISSN: 1214-2158
- Eriksson L., Wollmer P., Olsson C.G., Albrechtsson U., Larusdottir H., Nilsson R., Sjögren A., Jonson B. Diagnosis of pulmonary embolism based upon alveolar dead space analysis. *Chest*. 1989; 96 (2): 357-362. DOI: 10.1378/chest.96.2.357. PMID: 2752819
- Böhm S.H., Maisch S., von Sandersleben A., Thamm O., Passoni I., Martínez Arca J., Tusman G. The effects of lung recruitment on the Phase III slope of volumetric capnography in morbidly obese patients. *Anesth. Analg.* 2009; 109 (1): 151-159. DOI: 10.1213/ane.0b013e31819bcb55. PMID: 19535705
- Tusman G., Groisman I., Fiolo F.E., Scandurra A., Arca J.M., Krumrick G., Böhm S.H., Sipmann F.S. Noninvasive monitoring of lung recruitment maneuvers in morbidly obese patients: the role of pulse oximetry and volumetric capnography. *Anesth. Analg.* 2014; 118 (1): 137-144. DOI: 10.1213/01.ane.0000438350.29240.08. PMID: 24356163
- Blanch L., Lucangelo U., Lopez-Aguilar J., Fernandez R., Romero P.V. Volumetric capnography in patients with acute lung injury: effects of positive endexpiratory pressure. *Eur. Respir. J.* 1999; 13 (5): 1048-1054. DOI: 10.1034/j.1399-3003.1999.13e19.x. PMID: 10414403
- Fengmei G., Jin C., Songqiao L., Congshan Y., Yi Y. Dead space fraction changes during PEEP titration following lung recruitment in patients with ARDS. *Respir. Care*. 2012; 57 (10): 1578-1585. DOI: 10.4187/respcare.01497. PMID: 22417650
- Hermely A., Jakubová M., Šalantay J., Čandík P., Sopko I., Májek M., Čocherová J., Török P. Non-invasive airway cleansing with application of expulsion effect of HFJV (High Frequency Jet Ventilation). *Obshchaya Reanimatologiya = General Reanimatology*. 2010; 6 (6): 71-78. DOI: 10.15360/1813-9779-2010-6-71
- Verschuren F., Sanchez O., Righini M., Heimonen E., Le Gal G., Meyer G., Perrier A., Thys F. Volumetric or time-based capnography for excluding pulmonary embolism in outpatients? *J. Thromb. Haemost.* 2010; 8 (1): 60-67. DOI: 10.1111/j.1538-7836.2009.03667.x. PMID: 19874457
- Unzueta C., Tusman G., Suarez-Sipmann F., Böhm S., Moral V. Alveolar recruitment improves ventilation during thoracic surgery: a randomized controlled trial. *Br. J. Anaesth.* 2012; 108 (3): 517-524. DOI: 10.1093/bja/aer415. PMID: 22201185

Received 09.05.18