

Оценка эффектов аппаратного мертвого пространства, создаваемого тепловлагодберегающим фильтром, при искусственной вентиляции легких у новорожденных

А.Н. Шмаков^{1,2}, К.В. Бударова^{1,2}, Н.Л. Елизарьева^{1,2}, В.Н. Кохно¹

¹ Государственная Новосибирская областная клиническая больница
630008, г. Новосибирск, ул. Немировича-Данченко, 130

² Новосибирский государственный медицинский университет Минздрава России
630091, г. Новосибирск, Красный пр., 52

Резюме

Тепловлагообменные фильтры создают дополнительное мертвое пространство у недоношенных новорожденных детей, сравнимое по объему с физиологическим, что теоретически может затруднить удаление углекислого газа. Снижение объема мертвого пространства повышением потока в контуре вентилятора может привести к противоположному осложнению – гипокании. **Цель работы** – определить безопасность и эффективность увеличения скорости потока газа в контуре вентилятора с целью компенсации повышенного парциального давления углекислого газа, создаваемого дополнительным мертвым пространством. **Материал и методы.** В условиях транспортировок на искусственной вентиляции легких исследовано влияние дополнительного мертвого пространства, создаваемого термовлагодберегающим фильтром, на сатурацию гемоглобина и парциальное давление углекислого газа в конце выдоха у недоношенных новорожденных детей при потоках в контуре 5 и 6 л/мин. **Результаты и их обсуждение.** Продемонстрировано, что скорость потока кислородо-воздушной смеси 5 и 6 л/мин удовлетворительно компенсирует влияние дополнительного мертвого пространства, не провоцируя гипоканию, что позволяет рекомендовать широкое использование термовлагодберегающих фильтров у новорожденных детей с массой тела не менее 1,0 кг при длительных транспортировках.

Ключевые слова: новорожденные, мертвое пространство, термовлагодберегающий фильтр, гиперкапния, гипокания.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Автор для переписки: Шмаков А.Н., e-mail: shmakov1948@inbox.ru

Для цитирования: Шмаков А.Н., Бударова К.В., Елизарьева Н.Л., Кохно В.Н. Оценка эффектов аппаратного мертвого пространства, создаваемого тепловлагодберегающим фильтром, при искусственной вентиляции легких у новорожденных. *Сибирский научный медицинский журнал.* 2022;42(5):69–73. doi: 10.18699/SSMJ20220509

Evaluation of deadspace effects created by heat and moisture exchange filter during artificial lung ventilation in newborns

A.N. Shmakov^{1,2}, K.V. Budarova^{1,2}, N.L. Elizar'eva^{1,2}, V.N. Kokhno¹

¹ State Novosibirsk Regional Clinical Hospital
630087, Novosibirsk, Nemirovich-Danchenko str., 130

² Novosibirsk State Medical University of Minzdrav of Russia
630091, Novosibirsk, Krasny ave., 52

Abstract

Heat and moisture exchange filters create additional dead space, comparable in volume to physiological, in premature newborns. It makes carbon dioxide remove difficulty. Reducing the dead space volume by increasing the flow in the ventilator circuit can lead to the hypocapnia. **Aim** of the study was to determine the safety and efficiency of gas flow boost in the ventilator circuit to hypercapnia compensation created by the additional dead space. **Material and methods.** The effect of the additional dead space created by a heat and moisture exchange filter on hemoglobin saturation and partial pressure of carbon dioxide at the end of expiration in premature newborns at flows of 5 and 6 l/min was studied. **Results and discussion.** It has been demonstrated that flows of 5–6 l/min satisfactorily compensate for the effect of additional deadspace without hypocapnia. **Conclusions.** It is possible to recommend the widespread use of heat and moisture exchange filters in newborn weighing at least 1.0 kg during long-term transportation.

Key words: newborns, dead space, heat and moisture exchange filter, hypercapnia, hypocapnia.

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

Correspondence author: Shmakov A.N., e-mail: shmakov1948@inbox.ru

Citation: Shmakov A.N., Budarova K.V., Elizar'eva N.L., Kokhno V.N. Evaluation of deadspace effects created by heat and moisture exchange filter during artificial lung ventilation in newborns. *Sibirskiy nauchnyy meditsinskiy zhurnal* = *Siberian Scientific Medical Journal*. 2022;42(5):69–73. [In Russian]. doi: 10.18699/SSMJ20220509

Введение

Потребность в длительных транспортировках новорожденных на искусственной вентиляции легких в стационары специализированной медицинской помощи снижается по мере развития перинатальных центров, но остается актуальной [1]. Так, из центральных районных больниц в отделения Новосибирской областной клинической больницы ежегодно эвакуируется автотранспортом от 105 до 129 новорожденных, в том числе недоношенных с очень низкой массой тела, медиана продолжительности эвакуации составляет 2,75 часа, вариационный размах – от 0,75 до 6,5 часа. 82 % новорожденных эвакуируются на искусственной вентиляции легких (ИВЛ), поэтому одним из важных аспектов безопасности транспортировки и поддержания качества жизни больного в пути является кондиционирование инспираторного газа [2].

В отделениях реанимации и интенсивной терапии новорожденных кондиционирование используемых газовых смесей не является проблемой, но в условиях автомобильных транспортировок обеспечить адекватное увлажнение и обогрев дыхательной смеси не всегда просто. Увлажнитель и термошланг транспортного вентилятора, как правило, не создают относительную влажность газа в контуре выше 70 % при требуемой не менее 85 %, поскольку работа обогревателя салона снижает относительную влажность воздуха до 30–35 % [3]. Температура газов на входе в увлажнитель зависит от температуры не в инкубаторе, а в салоне, которая в зимних условиях может составлять 18–20 °С. Поэтому при длительных эвакуациях детей, в том числе новорожденных, рекомендуется применение термо-

влагосберегающего фильтра на входе в коннектор эндотрахеальной трубки [2, 3].

При этом увеличивается мертвое пространство за счет объема фильтра [4–6], особенно для недоношенных новорожденных. Объем коробки фильтра 3 мл создает для ребенка массой 1,5 кг дополнительное аппаратное мертвое пространство 2 мл/кг, повышая нормальный объем (2,2 мл/кг) на 110 %. Таким образом, отношение объема мертвого пространства (V_d) к дыхательному объему (V_t) достигает 0,7–0,8, если принимать величину нормы V_t 5–6 мл/кг [2, 3, 6]. Для ребенка массой 3 кг дополнительное мертвое пространство при этом составит 1 мл/кг (прирост на 45 %), что даст соотношение V_d/V_t 0,5–0,6 (при V_t 7мл/кг – 0,46). Нормальным считается отношение V_d/V_t 0,3; у взрослых по достижении $V_d/V_t \geq 0,5$ отмечается прирост парциального давления углекислого газа в крови, что может быть компенсировано повышением дыхательных объемов и (или) потока в контуре вентилятора [3–5]. Мертвое пространство у детей описывается довольно скупо, не признается важным фактором в регуляции обмена легочной воды [7], увеличение V_d регистрируется при легочной эмболии, но не считается ведущим фактором декомпенсации гипоксии [7, 8]. Иногда практикующие анестезиологи для уменьшения мертвого пространства у новорожденных обрезают эндотрахеальную трубку. Однако как польза от этого мероприятия, так и реальный вред дополнительного мертвого пространства при ИВЛ новорожденных в литературных источниках не описаны, чем и обусловлена актуальность данной работы.

Цель работы – определить безопасность и эффективность повышения потока газа в контуре вентилятора с целью компенсации повышенного

парциального давления углекислого газа, создаваемого дополнительным мертвым пространством.

Материал и методы

В пилотном обсервационном исследовании участвовали новорожденные дети в возрасте от 2 до 4 суток внеутробной жизни, рожденные на гестационных сроках от 28 до 35 недель с массой при рождении соответственно от 1,0 до 2,5 кг, со стабильными показателями гемодинамики и условно здоровыми легкими, находящиеся на ИВЛ в связи с необходимостью глубокой седации по поводу перенесенного интранатально гипоксического поражения головного мозга средней степени тяжести (оценка по шкале Апгар на первой минуте 4–5 баллов), нуждающиеся в переводе на более высокий уровень медицинской помощи. Критерии невключения: новорожденные с показаниями для ИВЛ, определяемыми дыхательной недостаточностью; пациенты с хирургической патологией; дети с массой при рождении более 2,5 кг; дети с критически низкой массой тела при рождении. Регистрировали показатели насыщения крови кислородом (SpO_2 , %) и концентрации углекислого газа в конце выдоха ($etCO_2$, мм рт. ст.) до установки фильтров и через 30 минут после установки. При этом параметры ИВЛ, установленные в стационарах вызова до приезда реанимационно-транспортной бригады, не изменяли. После второй регистрации SpO_2 и $etCO_2$ начинали транспортировку.

Участники распределены в две группы: группа 1 – 28 человек, из них 15 недоношенных детей массой от 1 до 1,5 кг и 13 детей массой от 1,51 до 2,5 кг. В этой группе поток в контуре вентилятора установлен 5 л/мин. Группа 2 (35 человек) сформирована из 17 недоношенных детей массой от 1 до 1,5 кг и 18 детей массой от 1,51 до 2,5 кг. В контуре вентилятора у этих детей установлен поток 6 л/мин. Кроме потока в контуре параметры ИВЛ были идентичными: объемы вдоха (V_t) 6 мл/кг; соотношение $i:e$ 1:2; максимальное давление на вдохе (PIP) 18–21 мбар; положительное давление конца выдоха (PEEP) 4 мбар; частота вдохов (Rate) в зависимости от массы тела 45–60 $мин^{-1}$; фракция кислорода на вдохе (FiO_2) 0,30; алгоритм триггирования «A/C». Седация пациентов поддерживалась инфузией фентанила 2 мкг/кг/ч (разрешено протоколом этического комитета № 61 от 12.04.2015, оформлено решением врачебной комиссии на основании статьи 37, п. 5 закона «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации» 323 ФЗ). Подбор стартового алгоритма ИВЛ проводили до установки термовлагосберегающего фильтра.

Анализируемые данные получали путем усреднения показателей, регистрируемых каждые 5 минут в течение 30 минут до установки фильтра и в течение 30 минут после установки фильтра. Характер распределения данных не определяли, поскольку для математической обработки использовали критерии непараметрической статистики (критерий Уилкоксона для сравнений типа «до–после»; критерий Манна – Уитни для попарных внутригрупповых и межгрупповых сравнений). Данные представлены в виде медианы, нижнего и верхнего квартилей (Me [Q25; Q75]).

Результаты

В группе 1 после установки фильтра у всех детей снизилась сатурация гемоглобина и повысилось парциальное давление углекислого газа в конце выдоха (таблица). Направленность изменений (критерий Уилкоксона) была достоверной, но по критерию Манна–Уитни статистически значимое повышение $etCO_2$ после установки фильтра отмечено только у детей массой более 1,5 кг. Оба показателя оставались в нормальном коридоре значений.

В группе 2 статистически значимой тенденции после установки фильтра по критерию Уилкоксона не получено (см. таблицу). Не изменились и значения сумм рангов по критерию Манна – Уитни, независимо от массы тела. До установки фильтров различий по величине SpO_2 и $etCO_2$ у детей массой до 1,5 кг и более 1,5 кг в обеих группах не было. После установки фильтров различий в сатурации гемоглобина в зависимости от массы тела не было, показатель $etCO_2$ в группах 1 и 2 у детей массой до 1,5 кг существенно не различался, а у детей массой более 1,5 кг стал статистически значимо ниже в группе 2 ($p = 0,000$; критерий Манна – Уитни), не выходя за пределы нормальных значений.

Обсуждение

Несмотря на заметное изменение соотношения V_d/V_t после подключения термовлагосберегающих антибактериальных фильтров к новорожденным (до 0,7 при нормальном соотношении 0,3), мы не зарегистрировали повышения $etCO_2$, выходящего за пределы нормальных значений. Таким образом, в наших наблюдениях при достижении отношения V_d/V_t 0,5 не отмечено описанного другими авторами [6, 7, 9] нарастания гиперкапнии, хотя в группе 1 $etCO_2$ значимо повысилось после установки фильтра у детей с умеренной недоношенностью. При этом показатель в группе 1 (поток газа в контуре 5 л/мин) был существенно выше, чем в группе 2 (поток в контуре 6 л/мин). Возможное объяснение полученно-

Влияние фильтра «3:1» на сатурацию гемоглобина и парциальное давление углекислого газа в конце выдоха у новорожденных на ИВЛ

Heat and moisture exchange filter influence “3:1” on hemoglobin saturation and end-tidal carbon dioxide in newborns on lung ventilation

Показатель	Группа 1				Группа 2			
	До установки фильтра	После установки фильтра	p_1	p_2	До установки фильтра	После установки фильтра	p_1	p_2
Масса 1–1,5 кг								
SpO ₂ , %	94 [92; 99]	92 [90; 98]	<0,022	0,052	95 [92; 99]	95 [92; 99]	>0,048	0,972
etCO ₂ , мм рт. ст.	37 [32; 44]	39 [34; 48]	<0,02	0,052	36 [32; 42]	36 [32; 48]	>0,048	0,958
Масса >1,5 кг								
SpO ₂ , %	96 [93; 99]	94 [91; 98]	<0,020	0,052	96 [94; 99]	96[95; 99]	>0,048	0,974
etCO ₂ , мм рт. ст.	34 [30; 38]	40 [36; 44]*	<0,020	0,002	34 [33; 38]	34 [32; 38]	>0,048	0,697

Примечание. p_1 – критерий Уилкоксона, p_2 – критерий Манна – Уитни, * – статистически значимое отличие от показателя группы 2 на данном этапе ($p = 0,000$, критерий Манна–Уитни).

го результата базируется на избыточности потока в контуре 5 л/мин и более для новорожденных детей с массой тела от 1 до 2,5 кг. Так, если принять для ребенка с массой тела 1,5 кг Vt 5 мл/кг, это составит 7,5 мл. При частоте вдохов 50 мин⁻¹ и соотношении i:e 1:2 это даст объем минутной вентиляции 0,375 л, который составляет 1/3 потока в контуре. Полный минимально достаточный поток, таким образом, будет 1,125 л/мин. Обычно принимается трехкратное превышение потока в контуре сверх минутной вентиляции, что в данном случае дало бы 3,4 л/мин, т.е. фактическое превышение потока составило 47 % сверх расчетного. Ребенку массой 2 кг в такой же ситуации расчетный поток был бы 4,05 л/мин, т.е. реальное превышение всего 23 % сверх расчетного. Поэтому у более крупных детей и отмечен прирост etCO₂ при потоке в контуре 5 л/мин. В группе 2 поток на 1 л/мин больше, чем в группе 1, что заведомо давало его существенный избыток в сравнении с расчетным даже для детей с массой, приближающейся к 2,5 кг.

Таким образом, мы убедились в безопасности применения термовлагосберегающих антибактериальных фильтров у новорожденных. Более того, результаты исследования позволяют предположить, что обычно используемые при ИВЛ у новорожденных потоки 5–6 л/мин избыточны, если не устанавливаются термовлагосберегающие фильтры, что создает риск ятрогенной гипоксии. Возможно, дополнительное патологическое альвеолярное мертвое пространство, например, в начальной стадии тромбоза легочной артерии [9] или для детей с высоким уровнем внутрилегочного шунтирования крово-

тока «справа-налево» при массивной пневмонии, инфаркте легкого [2, 10] явится показанием для повышения потока более 6л/мин, что требует дополнительных исследований, поскольку в авторитетных руководствах по интенсивной терапии новорожденных потоки газа в контурах вентиляторов упоминаются в качестве факторов риска волюмо- и баротравмы, но без количественных характеристик [10].

Выводы

1. Дополнительное аппаратное мертвое пространство у недоношенных новорожденных с массой тела при рождении не менее 1,0 кг, находящихся на ИВЛ, удовлетворительно компенсируется потоком газа в контуре вентилятора 5–6 л/мин.
2. При наличии термовлагосберегающего фильтра на линии вдоха потоки в контуре 5–6 л/мин не создают риска гипоксии у недоношенных новорожденных массой не менее 1 кг.
3. Термовлагосберегающие антибактериальные фильтры не создают опасность патологической гиперкапнии при ИВЛ у недоношенных новорожденных с массой при рождении не менее 1 кг.
4. При длительных межгоспитальных транспортировках новорожденных с массой не менее 1,0 кг использование термовлагосберегающих фильтров можно считать безопасным.

Список литературы

1. Шмаков А.Н., Кохно В.Н. Критические состояния новорожденных (технология дистанционного консультирования и эвакуации). СПб.; Новосибирск: ИПК БИОНТ, 2007. 168 с.

2. Александрович Ю.С., Пшениснов К.В. Респираторная поддержка при критических состояниях в педиатрии и неонатологии. Руководство для врачей. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2020. 272 с.

3. Borrows E.L., Lutman D.H., Montgomery M.A., Petros A.J., Ramnarayan P. Effect of patient- and team-related factors on stabilization time during pediatric intensive care transport. *Pediatr. Crit. Care Med.* 2010;11(4):451–456. doi: 10.1097/PCC.0b013e3181e30ce7

4. Гайтон А.К., Холл Дж.Э. Легочная вентиляция. В кн.: *Медицинская физиология*. М.: Логосфера, 2008, 532–533.

5. Хеденстиерна Г. Физиология дыхания. In: *Miller's Anesthesia*, 7th ed. Ed. R.D. Miller. Churchill Livingstone Elsevier, 7th ed. Philadelphia: Churchill Livingstone Elsevier, 2010. Пер. с англ. Е.В. Суборовой, ред. К.Н. Храпов. 2012. С. 387–418.

6. Broughton S.J., Sylvester K.P., Page C.M., Rafferty G.F., Milner A.D., Greenough A. Problems in the measurement of functional residual capacity. *Physiol. Meas.* 2006;27:99–107. doi: 10.1088/0967-3334/27/2/001

7. Hogg K., Dawson D., Tabor T., Tabor B., Mackway-Jones K. Respiratory dead space measurement in the investigation of pulmonary embolism in outpatients with pleuritic chest pain. *Chest.* 2005;128(4):2195–2205. doi: 10.1378/chest.128.4.2195

8. Марино П.Л. Острая дыхательная недостаточность. В кн.: *Интенсивная терапия*. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2010. С. 277–301.

9. Заболотских И.Б. Интенсивная терапия дыхательной недостаточности. В кн.: *Интенсивная терапия: национальное руководство*. Том 1. Ред. И.Б. Заболотских, Д.Н. Проценко. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2021. С. 449–473.

10. Майер Р.Ф., Обладен М. Респираторная поддержка. В кн.: *Интенсивная терапия новорожденных. Доказательность и опыт*. М.: МЕДпресс-информ, 2021. С. 171–179.

References

1. Shmakov A.N., Kokhno V.N. Critical conditions of newborns (technology of remote counseling and evacuation). Saint-Petersburg, Novosibirsk: IPK BI-ONT, 2007. 168 p. [In Russian].

2. Aleksandrovich Yu.S., Pshenisnov K.V. Respiratory support in critical conditions in pediatrics and neonatology. Guide for doctors. Moscow: GEOTAR-Media, 2020. 272 p. [In Russian].

3. Borrows E.L., Lutman D.H., Montgomery M.A., Petros A.J., Ramnarayan P. Effect of patient- and team-related factors on stabilization time during pediatric intensive care transport. *Pediatr. Crit. Care Med.* 2010;11(4):451–456. doi: 10.1097/PCC.0b013e3181e30ce7

4. Gayton A.K., Khol G.E. Pulmonary ventilation. In: *Textbook of Medical Physiology*. Moscow: Logosfera, 2008; 532–533. [In Russian].

5. Hedenstierna G. Respiratory physiology. In: *Miller's Anesthesia*, 7th ed. Philadelphia: Churchill Livingstone Elsevier, 2010. P. 361–392. [In Russian].

6. Broughton S.J., Sylvester K.P., Page C.M., Rafferty G.F., Milner A.D., Greenough A. Problems in the measurement of functional residual capacity. *Physiol. Meas.* 2006;27:99–107. doi: 10.1088/0967-3334/27/2/001

7. Hogg K., Dawson D., Tabor T., Tabor B., Mackway-Jones K. Respiratory dead space measurement in the investigation of pulmonary embolism in outpatients with pleuritic chest pain. *Chest.* 2005;128(4):2195–2205. doi: 10.1378/chest.128.4.2195

8. Marino P.L. Acute respiratory failure. In: *Intensive care*. Moscow: GEOTAR-Media, 2010. P. 277–301. [In Russian].

9. Zabolotskikh I.B. Intensive care for respiratory failure. In: *Intensive care: national guidance*. Vol.1 Ed. I.B. Zabolotskikh, D.N. Protsenko. Moscow: GEOTAR-Media, 2021. P. 449–473. [In Russian].

10. Maier R.F., Obladen M. Respiratory support. In: *Intensive care of newborns. Evidence and experience*. Moscow: MEDpress-inform, 2021. P. 171–179. [In Russian].

Сведения об авторах:

Алексей Николаевич Шмаков, д.м.н., ORCID: 0000-0001-6041-7607, e-mail: shmakov1948@inbox.ru

Кристина Владимировна Бударова, к.м.н., ORCID: 0000-0002-9265-978X, e-mail: bcv@yandex.ru

Наталья Львовна Елизарьева, д.м.н., ORCID: 0000-0002-0852-0372, e-mail: lisa.nataly@mail.ru

Владимир Николаевич Кохно, д.м.н., проф., ORCID: 0000-0002-5965-2594, e-mail: kair2007@mail.ru

Information about the authors:

Alexey N. Shmakov, doctor of medical sciences, professor, ORCID: 0000-0001-6041-7607, e-mail: shmakov1948@inbox.ru

Kristina V. Budarova, candidate of medical sciences, ORCID: 0000-0002-9265-978X, e-mail: bcv@yandex.ru

Natalya L. Elizar'eva, doctor of medical sciences, ORCID: 0000-0002-0852-0372, e-mail: lisa.nataly@mail.ru

Vladimir N. Kokhno, doctor of medical sciences, professor, ORCID: 0000-0002-5965-2594, e-mail: kair2007@mail.ru

Поступила в редакцию 06.07.2022

После доработки 09.08.2022

Принята к публикации 30.08.2022

Received 06.07.2022

Revision received 09.08.2022

Accepted 30.08.2022