

УДК 617-089.5-032:611.2

ПРИМЕНЕНИЕ АДСОРБЕНТОВ ПРИ ИНГАЛЯЦИОННОЙ АНЕСТЕЗИИ: ВОСТРЕБОВАННОСТЬ, РЕАКЦИИ ПОГЛОЩЕНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА, ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ИНГАЛЯЦИОННЫМИ АНЕСТЕТИКАМИ, ПРОБЛЕМЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ

Каташинский О.Ю., Золотарев А.И., Графов А.П., Драгунова Ю.А., Савченко Е.В., Гоженко А.И., Ковалевская Л.А.

*КУ «Одесская областная клиническая больница»
ООО «Айсблик»*

В данной статье представлены основные группы адсорбентов (хемосорбентов) углекислого газа, используемые сегодня при проведении ингаляционной анестезии по закрытому контуру, описаны механизмы связывания CO₂, устройство адсорберов. Большое внимание уделено продуктам деградации ингаляционных анестетиков, образующихся в результате их взаимодействия с адсорбентами CO₂. Даны рекомендации по безопасному использованию адсорбентов (хемосорбентов).

Ключевые слова: адсорбенты углекислого газа, ингаляционная анестезия, низкопоточная анестезия, продукты деградации ингаляционных анестетиков, пожары и возгорания.

Определение понятия

В последнее время во всем мире отметилась тенденция к увеличению доли ингаляционных анестезий. Это связано с открытием и внедрением в практику новых ингаляционных анестетиков – изофлюрана, энфлюрана, севофлюрана, десфлюрана, ксенона.

Потребность в ингаляционном компоненте анестезиологического обеспечения операций в мире очень высока: в некоторых странах до 77% общих анестезий осуществляется с использованием газовых анестетиков. К сожалению, в Украине доля ингаляционного наркоза в общей структуре анестезий составляет не более 4% (данные за 2008 г.). Однако в последние годы созданы условия, позволяющие обеспечить более широкое использование данного вида анестезии в ЛПУ Украины.

Прогрессивной технологией явля-

ется низкопоточная ингаляционная анестезия – подача в дыхательный контур малого и сверхмалого потоков свежих газов (low- и minimal-flow). Преимущества низкопоточной анестезии:

- снижение либо полное отсутствие загрязнения атмосферы операционной;
- предотвращение охлаждения и высушивания газовой дыхательной смеси;
- существенное снижение расхода ингаляционного анестетика (экономический выигрыш).

О низкопоточной анестезии уместно говорить в тех случаях, когда поток подаваемого в дыхательный контур свежего газа значительно ниже МВЛ (минутной вентиляции легких) и варьирует в диапазоне 0,5-1 л/мин. А ингаляционная анестезия по минимальному потоку подразумевает поддержание потока в

диапазоне от 0,2 до 0,5 л/мин (поток, равный 0,2-0,25 л/мин, именуется метаболическим). Одним из обязательных условий проведения такой анестезии является удаление углекислого газа из дыхательной смеси, так как выдыхаемая газовая смесь, смешиваясь с поступающим в контур свежим газом, вновь подается на линию вдоха (т.е. происходит реверсия дыхательной смеси) [24].

Адсорбенты – группа веществ, предназначенных для удаления кислых газов (в том числе углекислого газа) из дыхательных контуров наркозно-дыхательных аппаратов; в гипербарических камерах, в противогазах, водолазном снаряжении, подводных лодках и др. Процесс поглощения углекислого газа в таких устройствах является чисто химическим (а не физическим), поэтому логичнее было бы называть вещества-поглотители CO₂ хемосорбентами.

Классификация хемосорбентов (разделение на группы)

Применяемые в дыхательных контурах хемосорбенты различаются по основным признакам: по химическому составу; по геометрической форме гранул; по наличию либо отсутствию индикатора истощения; по прочности и устойчивости к механическим воздействиям.

Вышеперечисленные отличия обуславливают различную степень поглощения углекислого газа, различную степень разрушения гранул и образования пыли, различную степень образования токсических продуктов (в результате взаимодействия их с ингаляционными анестетиками), а соответственно и различную степень их эффективности и безопасности их применения.

По химическому составу их можно разделить на следующие основные группы (таб.№ 1):

- группа натриевой извести (натронной извести);
- группа бариевой извести;
- хемосорбенты с иным составом.

Реакции удаления углекислого газа из газовой смеси, имеющие место в хемосорберах, протекают в 3 этапа и сопровождаются выделением тепла и влаги.

Натронная известь взаимодействует с углекислым газом следующим образом:

1. $CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$;
2. $H_2CO_3 + 2NaOH \rightarrow Na_2CO_3 + 2H_2O + \text{тепло}$;
3. $Na_2CO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + 2NaOH + \text{тепло}$.

Химическое взаимодействие между бариевой известью и CO₂ протекает по следующей схеме:

1. $Ba(OH)_2 + 8H_2O + CO_2 \rightarrow BaCO_3 + 9H_2O + \text{тепло}$;
2. $9H_2O + 9CO_2 \rightarrow 9H_2CO_3$;
3. $9H_2CO_3 + 9Ca(OH)_2 \rightarrow 9CaCO_3 + 18H_2O + \text{тепло}$.

Группа натронной извести

Натронная известь представляет собой вещество, в состав которого входят 2 сильные щелочи: Ca(OH)₂ и NaOH (в некоторых препаратах и KOH). Включает в себя следующие хемосорбенты: DragerSorb 800; DragerSorb Free; Sodasorb и Sodasorb LF; Spherasorb; Sofnolime; Akrosorb Soda Lime; Medisorb; Intersorb и Intersorb RG; Carbolime; InterSorb Plus и др.

Группа бариевой извести

Бариевая известь также состоит из 2-х щелочей: Ca(OH)₂ и Ba(OH)₂. Данная группа представлена хемосорбентами: Baralyme и др.

Другие хемосорбенты: Amsorb; LoFloSorb и др.

Адсорбер – составляющая часть дыхательного контура

Хемосорбенты находятся в специальных емкостях – адсорберах, которые входят в состав дыхательного контура. Конструктивно они могут состоять из одной либо двух камер, чаще изготовленных из прозрачного материала.

Состав хемосорбентов (в %)

Хемосорбент	Ca(OH) ₂	KOH	NaOH	H ₂ O	Ba(OH) ₂
Бариевая известь (на примере Baralyme)	73	< 5	0	11-16	+
Натронная известь (на примере DragerSorb 800 Plus)	81	0	3	16	-
Хемосорбенты с иным составом (на примере Amsorb)	> 80	0	0	13-18	-

Примечание: в зависимости от фирмы-производителя процентный состав компонентов натронной извести может изменяться.

!
!

Таблица 1

В маятниковом контуре вдох и выдох осуществляется по одному шлангу. Клапан выдоха в данной системе также может быть закрыт или несколько приоткрыт; то есть маятниковый контур, как и циркуляционный, может быть полностью реверсивным либо частично реверсивным. Маятниковый контур имеет определенные недостатки: процесс адсорбции углекислого газа протекает менее эффективно и может сопровождаться определенными

Интенсивность распада (% в час) фторсодержащих ингаляционных анестетиков при их взаимодействии с натронной известью [23].

Температура	Десфлюран CHF ₂ -O- CHF ₂ CF ₃	Галотан CF ₃ -CHBrCl	Изофлюран CHF ₂ -O- CHClCF ₃	Севофлюран CH ₂ F-O- CH(CF ₃) ₂
22°C	H/O	0,83±0,00	0,04±0,00	6,46±0,87
37°C	H/O	0,52±0,00	0,06±0,00	31,04±0,48
40°C	0,083±0,086	0,63±0,11	0,20±0,09	12,0±0,4
54°C	H/O	2,21±0,00	0,30±0,00	57,36±2,05
60°C	-0,094±0,071	1,56±0,07	0,15±0,06	56,4±4,3
80°C	0,45±0,26	16,0±1,61	3,1±3,7	92,2±5,2

Примечание: H/O – не определяли.

!

Таблица 2

Удобно, когда адсорбер оснащен устройством включения/выключения газа, что может позволить анестезиологу при необходимости изъять его из дыхательного контура (например, при вводной анестезии, когда используются высокие потоки свежего газа; также при необходимости произвести замену хемосорбента во время анестезии).

Циркуляционный контур является наиболее распространенным реверсивным дыхательным контуром. Движение газа в данной системе осуществляется по отдельным шлангам – вдоха и выдоха. Если выдыхаемая смесь полностью возвращается в аппарат и не сбрасывается в атмосферу, такой контур именуется полностью реверсивным. Если часть выдыхаемой газовой смеси выбрасывается в атмосферу через предохранительный клапан, приоткрытый клапан выдоха и адаптер, то контур является частично-реверсивным. Газ, который сбрасывается, необходимо компенсировать подачей свежего газа.

негативными явлениями (перегревание вдыхаемой газовой смеси, быстрое истощение хемосорбента и др.), а потому и используется реже.

В зависимости от характера прохождения газа через поглотитель различают два основных типа адсорберов: прямоточные и с возвратно-поступательным движением газа.

В прямоточном адсорбере газ через входной патрубок поступает в слой хемосорбента и выходит в дыхательный контур аппарата. При этом имеет место так называемый пристеночный эффект, который заключается в том, что выдыхаемый газ проходит с большими скоростями у цилиндрических стенок адсорбера и с меньшими скоростями в его центральной части. Вследствие этого часть хемосорбента в верхней части адсорбера сравнительно плохо поглощает выдыхаемый углекислый газ [1].

В адсорбере с возвратно-поступательным движением газа последний входит в него по центральному патруб-

ку, меняет свое направление на 180° у его дна и поступает после этого в слой хемосорбента, после чего возвращается в дыхательный контур аппарата через патрубок выхода. Скорости течения в этом случае приблизительно одинаковы по всей высоте слоя и по площади адсорбера. Данный тип адсорберов является более удобным вследствие более равномерного распределения потока газа по всему хемосорбенту [1].

На эффективность адсорбции углекислого газа влияет и расположение адсорбера в дыхательном контуре. Наиболее оптимальным считается место между клапанами выдоха и вдоха, по течению выдыхаемого газа ниже предохранительного мешка и клапана.

Побочные продукты деградации ингаляционных анестетиков

В организме человека ингаляционные анестетики в большей либо меньшей степени (в зависимости от их физико-химических свойств) метаболизируются. Так, например, 17-20% галотана, < 0,2% изофлюрана, 2-5% севофлюрана, 0,02% десфлюрана подвержены биотрансформации. Метаболитами современных ингаляционных галогенсодержащих анестетиков являются: неорганический фторид-ион и органические фторсодержащие вещества (например, трифторуксусная кислота – для изофлюрана, десфлюрана; гексафторизопрופןил – для севофлюрана). Ксенон же, являясь по природе инертным газом, не метаболизируется [27].

В дыхательном контуре при определенных условиях галогенсодержащие ингаляционные анестетики также могут распадаться (при наличии многих преимуществ наиболее нестабильным из всех современных газовых анестетиков является севофлюран). Чаще всего элементом контура, где происходит распад ингаляционного анестетика является адсорбер (как результат взаимодействия анестетика с хемосорбентом). При этом образуются вещества, которые могут представлять опасность для пациента.

Процесс распада анестетиков является температурозависимым (чем выше температура в адсорбере, тем интенсивнее происходит разрушение анестетика), что отражено в таблице № 2.

Далее рассмотрены наиболее значимые клинически (а потому и наиболее часто упоминаемые в литературе) токсичные продукты, которые образуются в контуре в результате взаимодействия хемосорбентов и фторсодержащих ингаляционных анестетиков: вещество А и монооксид углерода.

Вещество А

Вещество А представляет собой галогенсодержащий углеводород – пентафторизопрופןил-фторметил-эфир. Образуется исключительно в контуре наркозно-дыхательного аппарата в результате распада ингаляционного анестетика севофлюрана (только данного анестетика!) под влиянием сильных оснований, присутствующих в хемосорбентах. Не является продуктом биотрансформации севофлюрана в организме человека [20].

Механизм разрушения севофлюрана при взаимодействии его с хемосорбентами выглядит следующим образом:

$$(\text{CF}_3)_2\text{CHOC}_2\text{F} + \text{OH}^- \rightarrow \text{CF}_2=\text{C}(\text{CF}_3)\text{OC}_2\text{F} + \text{F}^- + \text{H}_2\text{O}$$

севофлюран → вещество А (пентафторизопрופןил-фторметил-эфир)

Скорость образования вещества А и его количество зависят от:

- концентрации севофлюрана в дыхательном контуре. Чем выше подаваемая концентрация данного анестетика, тем большее количество вещества А образуется.
- температуры [17] и состава хемосорбента. Чем выше процентное содержание сильных щелочей в хемосорбенте, тем больше концентрация вещества А. Имеет значение также и тип щелочи (более высокий уровень вещества А образуется при наличии KOH). В некоторых исследо-

ваниях показано, что более интенсивно данный продукт образуется при высоких температурах, чем при низких [17, 20].

- степени насыщения хемосорбента водой (чем большее процентное содержание воды в хемосорбенте, тем меньшее количество данного вещества образуется). Наибольшее количество вещества А образуется при использовании свежего хемосорбента; по мере истощения последнего снижается и интенсивность образования данного вещества.
- накопление вещества А в контуре пропорционально реверсии дыхательной смеси. При уменьшении скорости подачи в дыхательный контур свежего газа часть выдыхаемой газовой смеси (а вместе с ней и вещество А) возвращается к пациенту, поэтому и концентрация данного вещества может возрастать со временем.

В исследованиях, проведенных на крысах, показано дозозависимое нефротоксическое действие данного вещества, которое приводило к развитию почечной недостаточности у животных. У крыс вещество А разрушается в почках под действием почечных цистеин-1-лиаз до токсичных метаболитов, которые и являются «виновниками» повреждения проксимальных канальцев почек [4, 17]. Впервые упоминание о негативном влиянии вещества А на почки крыс имеется в работе Morio и др., опубликованной в 1992 г. Затем появился ряд исследований, подтверждающих нефротоксичность этого вещества для данной группы грызунов. Авторы отмечают, что токсичность этого вещества больше зависит от времени воздействия его на организм крысы, чем от концентрации его на входе [20].

Предполагалось, что данное вещество также будет вызывать различные повреждения почек у людей. В результате проведенных исследований с учас-

тием пациентов, однако, не было описано ни одного случая повреждения почек метаболитами вещества А при низкопоточной анестезии севофлюраном с использованием различных хемосорбентов. Это объясняется гораздо меньшей цитозольной активностью почечных цистеин-1-лиаз в организме человека по сравнению с таковой у крысы (в 10-30 раз), что отражено в работах Kharasch, Lash и Lyer [4, 17]. При проведении низкопоточной анестезии севофлюраном на группе волонтеров, не имеющих патологии со стороны мочевыделительной системы, было отмечено транзиторное повышение экспериментальных маркеров почечной функции. Если считать протеинурию чувствительным маркером дисфункции почек, то данный показатель не отличался у людей при проведении анестезии севофлюраном и другими ингаляционными анестетиками (изофлюран, десфлюран, энфлюран), а также при использовании пропофола в качестве анестетика [20].

Также проведены аналогичные исследования почечных лиаз у обезьян циномогус, в которых определено, что их активность в 1-3 раза выше, чем у людей. У этих приматов были зафиксированы признаки нефротоксичности, которые были минимальными и носили обратимый характер, что еще раз косвенно подтверждает отсутствие нефротоксичности вещества А для человека.

И хотя большинство исследователей придерживаются мнения, что нефротоксичность вещества А у крыс (и возможная нефротоксичность у людей) связана с распадом цистеин S-конъюгата под воздействием 1-лиазы (выступает как катализатор) на токсичные метаболиты, имеются работы, в которых авторами предполагается существование других механизмов реализации нефротоксичности этого вещества. В данных исследованиях проводилось блокирование 3-х катализаторов (в том числе, и 1-лиазы), которые могли бы сыграть существенную роль в реализации процессов

повреждения почек. Однако, в результате исследования оказалось, что при этом не только не происходило уменьшение /нивелирование нефротоксического действия вещества А, но и в некоторых случаях отмечалось его усиление, что и дало возможность авторам предположить наличие других возможных механизмов реализации процессов повреждения почек веществом А [22].

Можно сделать выводы, что при проведении ингаляционной анестезии по низкому потоку у людей образование вещества А (пентафторизопренилфторметил-эфира) не является проблемой и не может привести к каким-либо негативным последствиям для пациента [15, 18, 20]. Однако некоторые специалисты все же не рекомендуют применять севофлюран при газотоке 1,5 л/мин дольше 3-4 ч [2].

Монооксид углерода (угарный газ, СО)

Одним из наиболее токсичных продуктов, образующихся в результате взаимодействия ингаляционных анестетиков и хемосорбентов, является монооксид углерода. В организме человека он тесно связывается с гемоглобином (обладает в 200 – 250 раз большим сродством к гемоглобину, чем кислород), в результате чего образуется карбоксигемоглобин (СОHb), нарушается возмож-

ность гемоглобина переносить кислород [3, 7], что приводит к развитию тяжелой тканевой гипоксии. Особенно значимой является реакция связывания угарного газа с гемоглобином у пациентов с анемией [19]. Кроме того, монооксид углерода изменяет аллостерическую структуру гемоглобина, затрудняя отдачу кислорода в тканях. СО оказывает также прямое токсическое воздействие на ткани, замещая кислород в таких тканевых гемопroteинах, как миоглобин, пероксидаза, каталаза, цитохромы [3].

Количество карбоксигемоглобина в крови зависит от концентрации монооксида углерода во вдыхаемом воздухе и длительности экспозиции. Ниже представлена таблица, демонстрирующая взаимосвязь между концентрацией СО во вдыхаемом воздухе, содержанием карбоксигемоглобина в крови и клиническими проявлениями карбоксигемоглобинемии.

Вышеперечисленные клинические эффекты монооксида углерода заставляют крайне настороженно относиться к возможному его появлению в дыхательном контуре.

Наибольшее на сегодняшний день количество СО во вдыхаемом воздухе, образованное в результате деградации ингаляционного анестетика (севофлюрана) – 11 000 ppm (1,1 %) – зафиксировано в исследовании Elena J. Holak и сопр. [10], проведенным без участия пациентов либо животных.

В случаях же проведения реальных ингаляционных анестезий по малому потоку у людей наибольшее количество карбоксигемоглобина в крови составило 29 %, что соответ-

Таблица 3
Взаимосвязь между концентрацией СО во вдыхаемом воздухе, содержанием карбоксигемоглобина в крови и клиническими проявлениями карбоксигемоглобинемии

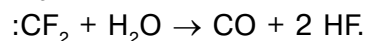
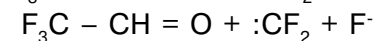
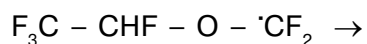
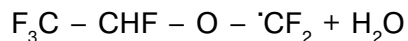
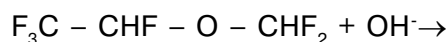
Концентрация СО во вдыхаемом воздухе (ppm/%)	Карбоксигемоглобин в крови (СОHb %)	Симптоматика
70/0,007	10	Головная боль, слабость.
120/0,012	20	Сильная головная боль, тошнота, рвота, головокружение, нарушение зрения
220/0,022	30	Тошнота, рвота, обморок, тахикардия и тахипноэ, неврологическая симптоматика
350—520/ 0,035-0,052	40—50	Кома, судороги, нарушения дыхания и сердечно-сосудистой деятельности
800—1200/ 0,08-0,12	60—70	Кома, судороги, артериальная гипотензия, брадикардия, угнетение дыхания
1950/0,195	80	Дыхательная недостаточность. Смерть

ствуется концентрации CO во вдыхаемом воздухе 120 – 220 ppm (0,012 – 0,022 %).

Исследователями было определено, что реакция между ингаляционным анестетиком и хемосорбентом, приводящая к формированию данного продукта, возникает в условиях обезвоживания/пересушивания хемосорбента (нормальное содержание воды в хемосорбенте – 13 – 15%). Также немалую роль играет и химический состав хемосорбента (большая вероятность образования CO при взаимодействии ингаляционного анестетика с КОН-содержащим хемосорбентом) [11]. Причем в некоторых исследованиях показано, что скорость образования монооксида углерода прямо пропорциональна концентрации щелочи в хемосорбенте. Caroline R. Stabernack и соотр. в своем исследовании показали, что замена сильных щелочей в хемосорбенте (KOH и NaOH) на Ca(OH)₂ предотвращает продукцию угарного газа [8]. Количество образованного CO зависит и от используемого ингаляционного анестетика; наиболее реактивными в этом плане оказались десфлюран и энфлюран. При взаимодействии, например, изофлюрана и энфлюрана с натронной известью последние распадаются с образованием некоторого количества флюороформа и аналога трихлорэтилена (хлоротрифлюороэтилена), которые под воздействием щелочи способны в свою очередь распадаться с образованием монооксида углерода. Также некоторые исследователи считают, что большее количество угарного газа образуется при большей концентрации ингаляционного анестетика (большая деградация анестетика '!' больше выделяется тепла '!' значительное повышение температуры хемосорбента '!' высушивание хемосорбента) [21]. Следует отметить, что образование меньшего количества угарного газа не означает меньшую поглощательную способность хемосорбентом углекислого газа [11].

Предположительно, что ингаляционные анестетики, содержащие группу -

CHF₂ (изофлюран, десфлюран), взаимодействуют с сильными щелочами, входящими в состав хемосорбентов, приводя к образованию монооксида углерода следующим образом [25]:



Для севофлюрана механизм образования монооксида углерода представляется несколько иным. При взаимодействии данного ингаляционного анестетика с полностью высушенным хемосорбентом (!) происходит его распад на гексафторизопропанол (ГФИП) и формальдегид. ГФИП является неактивным веществом, быстро подвергается глюкуронизации и выводится из организма с мочой. При дальнейшем взаимодействии с полностью высушенным хемосорбентом формальдегид может, в свою очередь, распадаться на метанол и муравьиную кислоту. При наличии высокой температуры в адсорбере из муравьиной кислоты (CH₂O₂) может образовываться монооксид углерода. Метанол же может вступать во взаимодействие с веществом А (C₄H₂F₆O), приводя к образованию вещества В (пентафторметоксиизопропилфторметилового эфира, C₅H₆F₆O) [26, 27].

В исследовании, проведенном Z. X. Fang и соотр. [21], определено, что полностью высушенная натронная известь в результате взаимодействия с галогенсодержащими анестетиками продуцирует гораздо большее количество угарного газа, чем содержащая 1,4% воды, а натронная известь, содержащая 4,8% воды, не приводит к образованию монооксида углерода. Что касается бариевой извести, то высокие концентрации угарного газа образуются при использовании полностью высушенного и содержащего 1,6% воды хемосорбента; бариевая известь с содержанием 4,7% воды продуцирует столько же CO, что и на-

тронная известь с 1,4% воды, и, наконец, бариевая известь не продуцирует угарный газ при содержании не менее 9,7% воды.

Наибольшая вероятность обезвоживания/высушивания хемосорбента возникает при следующих условиях [7]: наркозно-дыхательный аппарат не используется в течение какого-то времени (например, в выходные дни), в то время как продолжается поток свежего газа через адсорбер.

В исследованиях показано, что большее количество CO образуется при разрушении изофлюрана, энфлюрана и десфлюрана до превышения температуры в адсорбере 50 °С; в то время как при использовании севофлюрана пороговым значением температуры в адсорбере, при которой может образоваться CO в клинически значимой концентрации является значение 70-80 °С. Исследователями было установлено, севофлюран приводит к образованию CO при взаимодействии с высушенным хемосорбентом при температуре $e^{70^{\circ}\text{C}}$ [10].

Также различной является зависимость количества образованного CO от содержания воды в хемосорбенте при взаимодействии последнего с различными ингаляционными анестетиками. При использовании изофлюрана, энфлюрана и десфлюрана концентрация монооксида углерода сильно зависит от содержания воды в хемосорбенте, в то время как в течение первых 60-ти минут взаимодействие севофлюрана с полностью высушенным хемосорбентом и хемосорбентом, подвергшимся высушиванию в течение лишь 24-х часов, приводило к образованию одинаковой концентрации CO [10].

В исследовании, проведенном Elena J. Holak и сотр., была доказана взаимосвязь между образованием монооксида углерода и концентрацией севофлюрана [10].

Продукция CO тем больше:

- чем больше МОД (минутный объем дыхания), тем больший контакт анестетика с хемосорбентом;
- чем меньше влажность хемосорбента, тем больше происходит разрушение анестетика;
- чем больше происходит химических реакций, тем больше повышается температура в адсорбере, таким образом увеличивается продукция CO [10].

Основными сложностями в практической работе являются: невозможность рутинного определения обезвоживания хемосорбента и трудность выявления образования угарного газа и в конечном итоге карбоксигемоглобина [7, 18]. Изменение цвета индикаторсодержащих хемосорбентов указывает лишь на их истощение, а не на обезвоживание [12]. Однако быстрое изменение цвета индикатора в течение анестезии может косвенно указывать на образование CO [10]. На рынке на сегодняшний день представлено лишь несколько хемосорбентов, способных менять цвет при обезвоживании, так как этот процесс происходит одновременно с их истощением [18]. Определение образования карбоксигемоглобина и токсичность угарного газа во время анестезии сложно определить, так как симптомы отравления последним не являются патогномичными, а обычные устройства, используемые в операционной (такие как пульсоксиметр и газовый анализатор крови) не способны выявить карбоксигемоглобин; пульсоксиметр воспринимает карбоксигемоглобин как оксигемоглобин. Имеющиеся детекторы определения угарного газа и кооксиметры для определения карбоксигемоглобина являются дорогостоящими и в настоящее время широко не используются [7, 18].

Лучшим средством не допустить осложнений в операционной, связанных с воздействием угарного газа, является профилактика его образования. Это воз-

можно осуществить путем предотвращения условий обезвоживания хемосорбента. Для этого необходимо придерживаться ряда правил [7, 12, 15]:

1) в случае длительного неиспользования наркозно-дыхательного аппарата хемосорбент должен быть извлечен из корпуса адсорбера и помещен в специальную емкость. Хемосорбент должен храниться в специально предназначенных для него канистрах и засыпаться в адсорбер только в случае использования наркозного аппарата;

2) перед включением и тестированием наркозно-дыхательного аппарата необходимо убедиться в том, что до этого отсутствовал поток свежего газа через адсорбер. Если же такая ситуация (поток газа через адсорбер неработающего аппарата) зафиксирована, необходимо произвести замену хемосорбента в адсорбере;

3) по окончании каждой анестезии следует убедиться в том, что поток свежего газа прекращен;

4) по окончании рабочего дня все коннекторы и системы подачи газа должны быть отсоединены от наркозного аппарата;

5) все испарители должны быть закрыты по окончании работы;

6) необходимо производить замену хемосорбента в адсорбере не только при изменении его цвета, но и ориентируясь на данные мониторинга пациента (проскок CO_2 на вдохе; при наличии артериального катетера – на raCO_2);

7) целесообразно отслеживать и оценивать корреляцию между концентрацией анестетика, установленной на испарителе, и концентрацией вдыхаемого анестетика. Необъяснимые изменения газотока резкие изменения (повышение либо понижение) концентрации вдыхаемого анестетика в газовой смеси по отношению к установленной на испарителе должны рассматриваться как результат чрезмерного выделения тепла в адсорбере [12]; также следует на-

сторожиться при невозможности достичь одного либо более МАК (минимальная альвеолярная концентрация) ингаляционного анестетика несмотря на увеличение потока свежего газа и высокие значения, установленные на испарителе [10];

8) при проведении анестезии с большими потоками свежего газа и индукции (также используется высокий поток свежего газа) необходимо закрывать/снимать адсорбер, чтобы высокий газоток не проходил через хемосорбент;

9) с целью предотвращения обезвоживания хемосорбента некоторые авторы рекомендуют добавлять воду в адсорбер [21].

Исследователи рекомендуют также учитывать степень реактивности ингаляционного анестетика и химический состав хемосорбента в плане образования угарного газа при их взаимодействии.

В работах, посвященных данной проблеме, была определена следующая степень реактивности анестетиков (по продукции угарного газа) при их взаимодействии с обезвоженным хемосорбентом: десфлюран, энфлюран > изофлюран > галотан, севофлюран [6, 7, 21].

Анализируя описанные исследования и случаи, посвященные образованию монооксида углерода при взаимодействии ингаляционных анестетиков и хемосорбента, можно сделать выводы, что при выполнении описанных выше рекомендаций при проведении ингаляционной анестезии по низкому потоку образование клинически значимой концентрации CO в дыхательном контуре невозможно.

Пожары, возгорания и взрывы

В литературе описаны случаи возникновения пожаров и возгораний в операционной в результате взаимодействия ингаляционного анестетика севофлюрана с обезвоженной бариевой известью [5, 12]; в ряде исследований зафиксировано повышение температуры в адсорбере до 350-400 °C.

Основную роль в образовании избыточного тепла при взаимодействии севофлюрана с хемосорбентом играют:

- степень обезвоживания хемосорбента. Скорость деградации анестетика увеличивается при снижении процента воды в составе хемосорбента [14];
- химический состав хемосорбента (а именно присутствие в хемосорбенте сильных щелочей) [13, 14, 18].

Процесс разрушения анестетика можно предотвратить путем устранения условий высыхания хемосорбента (описаны выше) или путем использования хемосорбента, не содержащего в своем составе сильных моновалентных щелочей. Также исследователи обращают внимание на необходимость мониторинга температуры в адсорбере либо определения содержания угарного газа в контуре на протяжении анестезии.

Следует отметить, что все описанные случаи воспламенения частей дыхательного контура наблюдались при проведении анестезии по малому потоку севофлюраном, а в качестве хемосорбента применялся Varalyme (оказавшийся высушенным/обезвоженным!).

Условия хранения хемосорбента

Хранить в сухом, чистом помещении. Не допускать контакта с химическими веществами, кислотами либо водой.

Герметичные оригинальные упаковки надежно защищают хемосорбент от высыхания. Сроки хранения должны быть указаны на упаковке. При вскрытии упаковки появляется риск потери влажности хемосорбента, поэтому емкость с хемосорбентом должна быть герметично закрыта.

Если хемосорбент остался в адсорбере, последний должен быть герметизирован так, чтобы не допустить контакта хемосорбента с воздухом (т.е. чтобы отсутствовал поток свежего газа через хемосорбент).

Нельзя допускать попадание ин-

тенсивного света на хемосорбент, поскольку имеющийся в нем индикатор истощения является светочувствительным и способен разрушаться.

Техника безопасности и меры предосторожности

При манипуляциях с хемосорбентом необходимо одевать защитные перчатки, маску и очки. Свежий хемосорбент (содержащий щелочи) способен разъедать кожу и слизистые, а использованный может быть контаминирован биологически опасным материалом.

Обеззараживание адсорберов

В 1941 г. Adriani и Rovenstine опубликовали исследование, целью которого было определение, обладает ли натронная известь бактерицидным свойством. При взаимодействии натронной извести с углекислым газом в адсорбере создается сильно щелочная среда (pH – 11-14). Исследователями предполагалось, что создаваемая щелочная среда будет губительно действовать на микроорганизмы, проходящие с потоком свежего газа через адсорбер. В данной работе рассматривались только 2 микроорганизма: кишечная палочка и микобактерии туберкулеза. Исследователи пришли к выводу, что при наличии в составе контура адсорбера с хемосорбентом исключается возможность передачи инфекции от одного пациента к другому через дыхательный контур в связи с бактерицидным действием натронной извести. Однако в дальнейших исследованиях было показано, что бактерицидное действие натронной извести реализуется только по отношению к некоторым микроорганизмам (например, *Staphylococcus aureus* и *Pseudomonas aeruginosa*), тогда как на большинство бактерий и вирусов данный хемосорбент не оказывает никакого влияния. Таким образом, адсорбер должен быть подвергнут периодической очистке и обеззараживанию. Для этого хемосорбент извлекают, а внутренние поверхности корпуса адсорбера моют водой с детергентом. Особое внимание

следует обратить на очистку решеток и рамки адсорбера, т. к. они загрязняются клейкой массой, образующейся из хемосорбента. Дезинфекцию производят по методикам, принятым в конкретном ЛПУ. Необходимо подвергать обработке также и уплотняющую прокладку, которую очищают и дезинфицируют тем же способом, что и другие детали из резины или пластмассы [1]. Кроме того, чтобы иметь возможность повторного использования хемосорбента, не допустив при этом контаминации контура различными патогенными микроорганизмами, рекомендовано при проведении анестезии использовать бактериальные/вирусные фильтры.

Выводы

1. Одним из обязательных условий проведения низкотоковой анестезии и анестезии по минимальному потоку является наличие эффективного хемосорбента углекислого газа.
2. В результате взаимодействия адсорбентов CO₂ из групп натронной и бариевой известей и ингаляционного анестетика могут образовываться побочные продукты: вещество А, моноксид углерода (СО).
3. Вещество А не оказывает какого-либо негативного воздействия на организм человека и при проведении ингаляционной анестезии по закрытому контуру может не приниматься во внимание.
4. Моноксид углерода (СО) является одним из наиболее токсичных продуктов, образующихся в результате взаимодействия ингаляционных анестетиков и хемосорбентов. Наибольшую роль в образовании данного вещества играет обезвоживание хемосорбента углекислого газа.
5. Образование клинически значимой концентрации СО в дыхательном контуре при проведении ингаляционной анестезии по низкому потоку невозможно при условии контроля за состоянием используемого хемо-

сорбента (своевременная замена; предотвращение высушивания).

6. Для предотвращения проникновения угарного газа (СО) из хемосорбента (извести) во вдыхаемую пациентом смесь следует рассмотреть возможность использования дополнительных хемосорбентов, поглощающих СО и расположенных по потоку за адсорбером с известью.
7. Адсорбер, как и другие компоненты дыхательного контура, должен периодически подвергаться обеззараживанию. С целью создания условий возможного повторного использования хемосорбента, не допустив при этом контаминации контура различными патогенными микроорганизмами, рекомендовано при проведении анестезии использовать бактериальные/вирусные фильтры.

Литература

1. А.И.Трушин, В.М.Юревич. Аппараты ингаляционного наркоза. М.: Медицина, 1989; с. 70 – 77, 170.
2. Брайан Дж. Поллард. Руководство по клинической анестезиологии. М: «МЕДпресс-информ», 2006, с.779-782.
3. Торшин В.А. Клинически значимые дисгемоглобины. Карбоксигемоглобин. http://www.in-met.ru/useful_information/disgemoglobine_carboximeglobine/.
4. СЕВОРАН. <http://bashanesth.ru/wp-content/uploads/sevoran.pdf>.
5. Barbara A. Castro, L. Allen Freedman. Explosion within an anesthesia machine: Baralyme, high fresh gas flows and sevoflurane concentration. *Anesthesiology* 2004; 101:537–539.
6. C. Keijzer, R.S.G.M. Perez, J.J. de Lange. Carbon monoxide production from five volatile anesthetics in dry soda lime in a patient model: halothane and sevoflurane do produce carbon monoxide. Department of Anesthesiology, Vrije Universiteit

- Medical Center, Amsterdam, The Netherlands. *European Journal of Anaesthesiology*. Volume 21, Supplement 32, 2004.
7. Carbon Monoxide Exposures during Inhalation Anesthesia: The Interaction between Halogenated Anesthetic Agents and Carbon Dioxide Absorbents. *Hazard [Health Devices Nov 1998; 27(11):402-4]*.
 8. Caroline R. Stabernack, Ronald Brown, Michael J. Laster. Absorbents differ enormously in their capacity to produce compound A and carbon monoxide. *Anesth Analg 2000; 90:1428-35*.
 9. Christiaan Keijzer, Roberto Perez and Jaap J. De Lange. Carbon monoxide production from five volatile anesthetics in dry soda-lime in a patient model: halothane and sevoflurane do produce carbon monoxide; temperature is a poor predictor of carbon monoxide production. *BMC Anesthesiology 2005, 5:6 doi:10.1186/1471-2253-5-6*.
 10. Elena J. Holak, David A. Mei. Carbon Monoxide Production from Sevoflurane Breakdown: Modeling of Exposures Under Clinical Conditions. *Anesth Analg 2003;96:757-64*.
 11. Erich Knolle, Georg Heinze, and Hermann Gilly. Small Carbon Monoxide Formation in Absorbents Does Not Correlate with Small Carbon Dioxide Absorption. *Anaeth & Analg Sep.2002 95:650-655*.
 12. Important safety information regarding the use of sevoflurane AF (Sevoflurane) in conjunction with anesthesia machines. November 17, 2003.
 13. Joel B. Gunter, MD, Professor, Clinical Anesthesia and Pediatrics Children's Hospital Medical Center, Cincinnati, OH. Fires in the OR.
 14. Junzheng Wu, M.D., Joseph P. Previte, M.D., Elena Adler, M.D., Troy Myers, John Ball, A.S., Joel B. Gunter, M.D. Spontaneous Ignition, Explosion, and Fire with Sevoflurane and Barium Hydroxide Lime. *Anesthesiology 2004; 101:534-7*.
 15. Low Flow Anaesthesia with Draeger Machines. Technical preconditions for safe performance of low flow anaesthesia. Are there specific requirements on the composition or the handling of carbon dioxide absorbents in low flow anaesthesia? p.84-87.
 16. Masami Osawa, Tetsutaro Shinomura, Masahiro Murakawa. Compound A concentration and the temperature of CO₂ absorbents during low-flow sevoflurane anesthesia in surgical patients. *J Anesth (1995) 9:1-5*.
 17. Merja Laisalmi. Detection of renal dysfunction during and after anesthesia and surgery: evaluation of the influence of inorganic fluoride, ketorolac and clonidine. Academic dissertation. Helsinki, 2006, p. 29-31.
 18. Michael A. Olympio. Carbon dioxide absorbent desiccation safety conference convened by APSF. *Newsletter 2005, vol. 20, № 2, p.25-29*.
 19. Randy S. Fatheree, D.O., Barbara L. Leighton, M.D. Acute respiratory distress syndrome after an exothermic Baralyme-Sevoflurane reaction. *Anesthesiology 2004; 101:531-3*.
 20. Shouldn't we finish the endless discussion: Compound A still a matter of concern? Prof. Jonny Hobbhahn, Clinic of Anaesthesiology; University of Regensburg, Regensburg, Germany. Association for low flow anaesthesia. 2004, session 2-3.
 21. Z. X. Fang, MD, E. I Eger II, MD, M. J. Laster, DVM, B. S. Chortkoff, MD, L. Kandel, BS. Carbon Monoxide Production from Degradation of Desflurane, Enflurane, Isoflurane, Halothane, and Sevoflurane by Soda Lime and Baralyme. *Anesth Analg 1995; 80:1187-93*.

22. J. L. Martin, M. J. Laster, L. Kandel. Metabolism of compound A by renal cysteine-S-conjugate lyase is not the mechanism of compound A-induced renal injury in the rat. *Anesth Analg* 1996; 82:770-4.
23. SODASORB. Manual of CO₂ absorption. W. R. Grace & CO.-Conn. 1993, Library of Congress Catalog Card No. 92-0700220, Second Printing.
24. О.Ю.Каташинский, Д.А.Радюшин, А.П. Графов, А.И.Гоженко. Посторонние вещества в закрытом ингаляционном контуре, образующиеся в результате метаболизма пациента и деградации ингаляционных анестетиков. Актуальные проблемы транспортной медицины. – 2012. – № 1 (27); с. 124-132.
25. A.T. Saber, K.S. Hougaard. Isoflurane, sevoflurane and desflurane. University of Gothenburg. The Nordic Expert Group for Criteria Documentation of Health Risks from Chemicals. 2009;43(9).
26. Sevoflurane Product Monograph. Baxter Corporation. Mississauga, Ontario January 20, 2012; p. 19.
27. T.K.Agasti. Textbook of Anesthesia for Postgraduates. Jaypee Brothers Medical Publishers, 2011; p. 394-447.

Резюме

ЗАСТОСУВАННЯ АДСОРБЕНТІВ ПРИ ІНГАЛЯЦІЙНОЇ АНЕСТЕЗІЇ: ЗАТРЕБУВАНІСТЬ, РЕАКЦІЇ ПОГЛИНАННЯ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ, ВЗАЄМОДІЯ З ІНГАЛЯЦІЙНИ АНЕСТЕТИКИ, ПРОБЛЕМИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ

Каташинська О.Ю., Золотарьов А.І.,
Графів А.П., Драгунова Ю.А.,
Савченко О.В., Гоженко А.І.,
Ковалевская Л.А.

У даній статті представлені основні групи адсорбентів (хемосорбентів) вуг-

лекислого газу, що використовуються сьогодні при проведенні інгаляційної анестезії по закритому контуру, описано механізми зв'язування CO₂, влаштування ад-сорберов. Велику увагу приділено продуктам деградації інгаляційних анестетиків, що утворюються в результаті їх взаємодії з адсорбентами CO₂. Дано рекомендації щодо безпечного використання адсорбентів (хемосорбентів).

Ключові слова: адсорбенти вуглекислого газу, інгаляційна анестезія, низько-поточкова анестезія, продукти деградації інгаляційних анестетиків, пожежі та загоряння.

Summary

THE USE OF ABSORBENTS DURING INHALATIONAL ANESTHESIA: NECESSITY, MECHANISMS OF CARBON DIOXIDE ABSORPTION, INTERACTION WITH VOLATILE ANESTHETICS, PROBLEMS IN APPLICATION

*Katashinsky O.Yu, Zolotarev A.I.,
Grafov A.P., Dragunov Yu.A.,
Savchenko E.V., Gozhenko A.I.,
Kovalevskaya L.A.*

This article represents data on the main groups of carbon dioxide absorbents, that are used in providing the closed-circuit inhalation anesthesia; demonstrates the mechanisms of carbon dioxide absorption and structure of the absorbers. The great attention is given on adverse reaction products of inhalational anesthetics with carbon dioxide absorbents. Some recommendations are given to strengthen safety in application of carbon dioxide absorbents.

Keywords: carbon adsorbents, inhalation anesthesia, low-flow anesthesia, the anesthetic degradation products, fires and burns.

*Впервые поступила в редакцию 25.06.2012 г.
Рекомендована к печати на заседании редакционной коллегии после рецензирования*