УДК 53.084.2

ВЫБОР ПЕРВИЧНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИЧЕКОЙ МЕДИЦИНСКОЙ АППАРУТЫ НА ОСНОВЕ КАПНОМЕТРИИ

В.А. Терехов
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
г. Барнаул

В данной статье рассмотрены понятия капнометрия, капнография. Приведено описание способов определения углекислого газа, обзор капнографов.

Ключевые слова: капнография, капнограмма, газоанализатор, диагностика.

Безопасность и эффективность лечения больных в большой мере зависит от полноты динамической информации, которой располагает лечащий врач. Одним из наиболее важных источников такой информации является капнометрия.

Метод анализа выдыхаемого воздуха человека в настоящее время приобрел широкое распространение в различных отраслях медицинской практики для определения нарушений дыхания.

Капнометрия – это измерение и цифровое отображение концентрации или парциального давления углекислого газа во время дыхательного цикла пациента. Графической реализацией капнометрии является капнография. В отличие от капнометрии, капнография, помимо анализа, проводит непрерывную регистрацию концентраций диоксида углерода (CO2) в выдыхаемом воздухе (в виде записей или волновых графиков). Регистрируемые при капнографии волновые графики могут быть основаны на оценке изменений концентраций CO2 с течением времени или при изменениях объема.[1]

Кривая изменения концентрации CO2 во времени называется капнограммой (см рисунок 1). Она отражает различные стадии выдоха. Капнограмма является важным диагностическим средством, так как имеет схожую форму у здоровых людей. Поэтому следует анализировать любое изменение формы капнограммы

Капнография применяется для выявления острых нарушений дыхания: в анестезиологической практике, реанимационных отделениях и палатах интенсивной терапии, где необходимо следить за быстро меняющимся состоянием больного. В функциональной диагностике дыхания – для выявления признаков хронической легочной недостаточности (ХЛН) [5].

Для анализа газовой смеси, а именно определения концентрации углекислого газа, разработано довольно большое количество методов. Однако для целей клинического мониторинга пригодны лишь те из них, которые соответствуют следующим требованиям:

- обеспечивают длительное измерение с немедленным отображением текущего значения;
- гарантируют достаточную для клиники точность измерения;
- реализуются в надежных, компактных и нетрудоемких в обслуживании мониторах;
- не нуждаются в частых калибровках, при этом сама процедура калибровки должна быть простой и не дорогостоящей;
- не представляют даже потенциальной опасности для пациентов и не дополняют вредными факторами (шум, электромагнитное излучение, инкубация инфекции и пр.) операционных и палат интенсивной терапии.

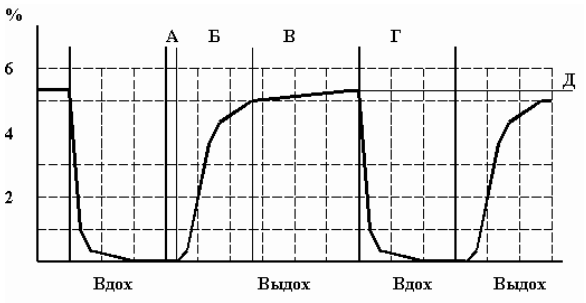

Рисунок 1 – Вид капнограммы

В настоящее время медицинская промышленность выпускает капнографы, работа которых основана на использовании одного из четырех способов определения CO2:

- масс-спектрометрии;

- рамановской спектрометрии;
- инфракрасного оптического анализа;
- инфракрасного оптико-акустического анализа.[1]

В последнее десятилетие наиболее широкое распространение в мире получили инфракрасные капнографы. Ввиду популярности последних двух способов определения CO2, рассмотрим каждый из них подробнее.

Инфракрасный оптический анализ основан на способности молекул газа поглощать инфракрасное излучение определенной длины волны. Этим свойством обладают не все газы, а лишь те, молекулы которых состоят из разных атомов. К ним относятся углекислый газ (CO2), закись азота (N20), пары воды (H2O) и летучие анестетики (галотан, энфлюран, изофлюран, се-вофлюран и пр.). Симметричные молекулы кислорода, азота или гелия не поглощают инфракрасное (ИК) излучение, и их присутствие не влияет на результаты измерения [2].

Каждому газу присущ свой собственный спектр поглощения, поэтому, применяя излучения разных длин волн инфракрасного диапазона, можно определять содержание различных компонентов в одной пробе газа.

Серьезная проблема в инфракрасной капнографии связана с чрезвычайной близостью спектров поглощения углекислого газа (4,25 мкм) и закиси азота (максимальное поглощение - на длине волны 3,86 мкм), причем одна из полос спектра поглощения N2O практически накладывается на ту полосу поглощения CO2, с помощью которой осуществляется измерение. Поэтому в присутствии закиси азота капнограф дает завышенные результаты измерения CO2, ошибка оказывается тем значительней, чем больше концентрация N2O в газовой смеси. Артефакты в измерении CO2 во время наркоза закисью азота иногда настолько существенны, что дело может закончиться необоснованной коррекцией режима вентиляции [3].

В мониторах, измеряющих концентрации CO2 и N2O по отдельности, имеется специальный алгоритм для исправления такой ошибки. Более простые модели либо не обращают внимания на эту проблему, либо просят указать, используется закись азота или нет. При получении подтверждения они включают элементарный алгоритм коррекции, который учитывает только сам факт применения закиси азота, но не ее концентрацию. Точность коррекции в этом случае невысока, но для клинических целей она достаточна.

Суть инфракрасного оптико-акустического метода заключается в том, что переход молекул газа в возбужденное состояние под воздействием инфракрасных волн сопровождается появлением звука, улавливаемого микрофоном. На дискепрерывателе находятся фильтры, попеременно пропускающие ИК-лучи с длинами волн, соответствующими линиям спектров поглощения исследуемых газов. Амплитуда звука определяется концентрацией газа. Встроенная программа анализирует фонограмму и выделяет из нее сигналы, соответствующие каждому компоненту газовой смеси. Метод отличается высокой точностью и стабильностью, а приборы, функционирующие на этом принципе занимают лидирующие позиции в данной области. На этом принципе работают, пожалуй, только мониторы датской фирмы BRUEL amp KJAER, например модель Bamp K 1304 - мультигазовый монитор с пульсоксиметрическим блоком. Измерительные блоки BRUEL amp KJAER установлены также и в мониторе MERLIN фирмы HEWLETT PACKARD.

Традиционная инфракрасная оптическая капнометрия по способам измерения концентрации CO2 разделяется на:

- капнометрию непосредственно в дыхательном потоке (mainstream);
- капнометрию вне дыхательного потока с непрерывным отбором пробы газа (sidestream).

Газоанализаторы, работающие по принципу mainstream, называют также капнографами прямого потока, так как сам датчик (измерительная камера) измерения концентрации CO2 устанавливается непосредственно в дыхательном контуре, между интубационной трубкой и тройником контура и измерение концентрации CO2 происходит в месте контакта датчика с дыхательной смесью. Расположение датчика и сам принцип измерения обуславливают повышенное быстродействие mainstream – капнографов (время реакции 30-60мс). Отсутствие в необходимости постоянного отбора проб газа и помпы делает mainstream – капнометрию наиболее оптимальной при анестезии по закрытому контуру. Кроме того, в отличие от sidestream – капнографов при mainstream – капнометрии нет необходимости в обезвоживании газовой смеси.

Однако этот метод капнометрии не лишен и весьма существенных недостатков:

- адаптеры основного потока и сам датчик тяжелы и громоздки, и тем самым не-

комфортны для пациента (особенно для детей и новорожденных);

• большой вес адаптера и датчика способствует перегибу интубационных трубок;

• большие размеры адаптера способствуют увеличению мертвого пространства;

• всегда присутствует риск поломки датчика, особенно при проведении экстренных процедур;

• невозможность определения других компонентов газовой смеси, кроме CO2;

• невозможность использования разнообразных адаптеров;

• высокая стоимость расходных материалов и особенно датчиков;

• несмотря на наличие системы подогрева адаптера, оптические сапфировые окошечки могут быть легко замутнены, или полностью блокированы конденсацией влаги и секретом дыхательных путей, особенно при использовании увлажненных дыхательных газов, что влияет на точность измерения. В связи с этим адаптеры необходимо регулярно чистить для предотвращения замутнения оптического пути;

• между использованиями адаптеры необходимо стерилизовать;

• иногда нагрев адаптеров может доходить до точки, при которой они становятся некомфортными как для пациента, так и для персонала, хотя эта проблема частично решена в некоторых новых моделях [2].

Sidestream – капнографы получили наиболее широкое распространение. Их также еще называют аспирационными капнографами, или капнографами бокового потока. Такое название вытекает из способа доставки проб газа в измерительную камеру. Из потока вдыхаемого и выдыхаемого газа с помощью специальной помпы по тонкой пластиковой трубке – магистрали непрерывно откачивается с постоянной скоростью часть газа и подаётся в измерительную камеру, расположенную внутри монитора. После выполнения анализа пробный газ либо сбрасывается в атмосферу, либо с помощью специальных магистралей возвращается в дыхательный контур. Такой подход к проблеме измерения концентрации CO2 дает целый ряд очень существенных преимуществ перед методом mainstream – капнометрии, самое главное из которых - возможность одновременного определения концентрации нескольких газов в одной пробе. Стало также возможным проводить мониторинг у неинтубированных пациентов. Кроме того, использование набора разнообразных легких адаптеров для самых разных клинических ситуаций, и для разных возрастных категорий пациентов обходится дешевле, чем приобретение комплекта дорогостоящих mainstream-датчиков на все случаи жизни.

Метод оптической инфракрасной капнометрии считается простым, хотя имеет множество технических проблем. Так, например, водяной пар (H2O) можно отнести к газам, состоящим из несимметричных молекул. Следовательно, наличие примеси водяного пара в газовой смеси и в измерительной камере искажает результаты измерения концентрации других компонентов газовой смеси из-за дополнительного поглощения водяным паром части потока инфракрасного излучения. Кроме того, конденсация воды на стенках прозрачной измерительной камеры может серьезно нарушить работу прибора. Поэтому пробы исследуемого газа перед попаданием в измерительную камеру обязательно должны быть обезвожены. На практике обезвоживание газовой смеси при капнометрии чаще всего проводится следующим образом – исследуемый газ перед попаданием в измерительную камеру пропускается через фильтр в кассете – водоотделителе. Задержанная фильтром вода стекает в прозрачный накопительный резервуар, который необходимо регулярно опорожнять по мере накопления конденсата. При переполнении конденсатом резервуара может произойти заброс жидкости в измерительную камеру, что приводит к выходу капнографа из строя.[1]

Другой немаловажной технической проблемой sidestream-капнографов является необходимость регулярных калибровок прибора, что приводит к постоянным, но необходимым, затратам средств для приобретения эталонных калибровочных газов.

По времени реакции прибора на изменение концентрации CO2 метод sidestream – капнометрии уступает методу mainstream – капнометрии, что обусловлено необходимостью доставки пробного газа до измерительной камеры по специальным магистралям. Время доставки зависит от скорости откачки газа, а также от длины магистрали. Была предпринята попытка решить эту проблему за счет вынесенного за пределы корпуса монитора блока с измерительной камерой. Расположение измерительного блока в непосредственной близости от пациента действительно позволило увеличить быстродействие прибора за счёт укорочения газовой магистрали. Это позволило уменьшить и скорость откачки пробного газа в измерительную ка-

меру до 50 мл/мин без потери качества измерения.

Основные недостатки и технические ограничения sidestream-капнометрии:

• необходимость обезвоживания анализируемого газа;

• высокая скорость забора пробы газа (примерно 150-200 мл/мин) ограничивает использование метода у новорожденных и детей;

• блокирование магистралей каплями конденсата и мокроты может приводить к турбулентности потока, и как следствие, к искажению формы капнограммы и артефактным значениям получаемых показателей;

• достаточно частые поломки газовой помпы, обязательного и необходимого элемента sidestream-капнометрии;

• постоянные затраты на приобретение различных расходных материалов (адаптеров, магистралей, фильтров, калибровочного газа).

Расширение границ практического применения капнографии потребовало от медицинской промышленности создания нового поколения компактных и более дешевых капнографов, простых в эксплуатации и не требующих значительных средств на обслуживание.

Эти технические ограничения традиционной капнографии варьируют от невозможности надежно измерять CO2 до практических проблем, таких как необходимость частой калибровки, опустошения ловушек для влаги, и замены трубок для забора проб.

Все это послужило предпосылками и основой для появления нового альтернативного метода газоанализа, который должен прийти на смену традиционной инфракрасной капнометрии.

Альтернативным методом газоанализа стала молекулярная корреляционная спектроскопия. Было предложено на измерительную камеру с исследуемым газом направить поток инфракрасного излучения только специфической для CO2 длины волны, что и позволило отказаться от уже ненужных теперь фильтров и вращающейся крыльчатки-прерывателя потока. Это было достигнуто благодаря замене традиционного инфракрасного источника на миниатюрный лазерный монохроматический излучатель.

Сокращение пути светового потока до измерительной камеры позволило уменьшить её размеры до 15 мкм3, что в свою очередь дало возможность сократить скорость откачки тест – газа до 50 мл/час.

Все эти преимущества технологии молекулярной корреляционной спектроскопии позволили значительно уменьшить размеры, вес и энергопотребление приборов и перейти к выпуску миниатюрных капнографов. Такие капнографы по принципу измерения концентрации CO2 также относятся к классу инфракрасных оптических газоанализаторов, так как применяемая методика измерения основана на свойстве углекислого газа поглощать инфракрасное излучение определенной длины волны. По способу доставки анализируемого газа в измерительную камеру их формально тоже можно отнести к sidestream – капнографам. Однако техническая реализация процесса доставки пробного газа в измерительную камеру была решена очень оригинально и высокотехнологично. Эта технология в дальнейшем была запатентована как метод микроструйной капнометрии (Microstream) [5].

Сегодня медицинские капнографы выпускаются десятками различных фирм. Нередко одна фирма предлагает несколько моделей мониторов, каждая из которых имеет свои плюсы и минусы. Необходимая точность измерения концентрации CO2 обеспечивается любым из четырех методов анализа, важен не сам метод, а то, насколько качественно он реализован. Выведение на дисплей капнограммы – один из главнейших плюсов модели, резко увеличивающий диагностические возможности метода. Инновацией в данной области является использование биологической обратной связи, ее суть заключается в использовании следящих систем для получения информации о протекании различных процессов в теле с целью сознательного управления ими. Получая данные о процессах, которые обычно протекают независимо от воли человека, многие люди обучаются в какой-то степени управлять этими процессами, чтобы улучшить свое самочувствие. В случае с капнографией для терапевтических нужд, пациент может управлять своим дыханием, изменять частоту дыхания, а также глубину вдоха/выдоха. Изменяя перечисленные параметры, будет меняться форма капнограммы, тем самым он может корректировать ее, глядя на эталонную капнограмму, которая в свою очередь также отображается на приборе (см. рисунок 1). К капнографу, имеющему в своем составе биологическую обратную связь, помимо всех его диагностических, терапевтических функций, добавляется еще одна – тренировочная, тем самым функциональность прибора расширя-

ется и данный капнограф существенно выигрывает у обычных капнографов.

Таким образом, капнограф, имеющий возможность графического отображения информации, использования биологической обратной связи, а также имеющий программное обеспечение, которое позволит эффективно использовать преимущества обратной связи, станет совершенно новым, функционально богатым прибором в различных областях медицинской практики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бокша В.Г., Карпов А.П. Изучение дыхательной функции легких методом капнографии. Ж. Тер. Арх., 1972, т. 44, в. 8, с. 36 – 39.
2. Виницкая Р.С., Цузмер Т.С., Коганова Н.А. Применение инфракрасного газоанализатора CO_2 для анализа альвеолярного воздуха. Сб. «Новые приборы газового анализа в современной медицине», Казань, 1967, с. 158 – 165.
3. Виницкая Р.С., Коганова Н.А. Определение чувствительности дыхательного центра к CO_2 у человека. Физиол. ж. СССР, 1967, т. 63, № 4, с. 450 – 454.
4. Виницкая Р.С., Коганова Н.А. Особенности определения минутного кровотока методом возвратного дыхания. Бюл. эксп. биол. и мед., 1977, № 2. с. 245 – 247.
5. Сильвестров В.П., Семин С.Н. и др. Возможности капнографии в ранней диагностике обструктивных нарушений вентиляции. Тер. арх., 1989, т. 61, № 3, с. 91 – 94.

Терехов Владимир Александрович – аспирант, тел.: 8-913-238-10-63, e-mail: ftf_555@km.ru