

10;12

## Использование масс-спектрометра в качестве капнографа в аппарате ингаляционной анестезии

© В.А. Елохин,<sup>1</sup> Т.Д. Ершов,<sup>1</sup> А.И. Левшанков,<sup>2</sup> В.И. Николаев,<sup>1</sup> А.Ю. Елизаров<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Закрытое акционерное общество „Научные приборы“,  
198103 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова,  
194044 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

e-mail: elokhin@sinstr.ru, orienteer@yandex.ru, anlev@inbox.ru, nikolaev@sinstr.ru, a.elizarov@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 22 марта 2010 г.)

Представлены новые возможности использования масс-спектрометра для мониторинга концентрации углекислого газа и ингаляционного анестетика в дыхательном контуре аппарата ингаляционной анестезии. Приводятся сравнения масс-спектрометрических и оптических измерений содержания  $\text{CO}_2$  и ингаляционного анестетика. Продемонстрированы преимущества использования масс-спектрометра в качестве капнографа по сравнению с оптическим спектрометром. Показана зависимость колебаний содержания ингаляционного анестетика в выдыхаемом воздухе от эффективности мышечной релаксации.

В последнее время появились сообщения, что измерения содержания  $\text{CO}_2$ , произведенные штатным капнографом аппарата ингаляционной анестезии (АИА), не удовлетворяют требованиям, необходимым для анализа синхронизации искусственной вентиляции легких во время низкопоточной ингаляционной анестезии (поток свежей смеси газов составляет  $1000 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ ) [1,2]. Этот эффект может быть обусловлен необходимостью селективного определения содержания  $\text{CO}_2$  в многокомпонентной газовой смеси в дыхательном контуре (ДК) АИА. Поток газа из ДК АИА, отбираемый для анализа при помощи инфракрасного (ИК) спектрометра составляет до  $250 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$  [1]. Требование для анализа указанного потока вызвано низкой чувствительностью ИМ-спектрометра, которая обусловлена низким коэффициентом поглощения молекулами излучения  $\text{CO}_2$  в ближнем ИК-диапазоне. В подавляющем большинстве ингаляционных аппаратов перекачка газовой смеси из капнографа обратно в ДК АИА не реализована, что сопряжено с необходимостью установки дополнительного компрессора, работающего в режиме вдох-выдох.

В настоящее время широко используется низкопоточная ингаляционная анестезия, при которой поток свежей газовой смеси в ДК АИА составляет  $500 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$  [3] и в этом случае использование  $250 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$  для анализа содержания  $\text{CO}_2$  становится проблематичным. В этом случае показания капнографа корректируются математическими моделями, алгоритмы которых широко обсуждаются и в настоящее время они еще далеки от совершенства [2].

В настоящей работе, выполненной по результатам нейрохирургических операций, для получения достоверных значений содержания  $\text{CO}_2$  в ДК АИА использовался масс-спектрометр с закрытым ионным источником ионов с вольфрамовым катодом. Забор пробы

из ДК АИА осуществлялся при помощи вакуумной системы двухступенчатой дифференциальной откачки, которая присоединялась непосредственно к эндотрахеальной трубке ДК АИА. Вакуум в масс-спектрометре поддерживался при помощи турбомолекулярного насоса производительностью  $60 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ . Скорость вакуумирования дифференциальной камеры составляла  $20 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ . Перепад давлений ступеней дифференциальной откачки составлял  $10^5 - 3 - 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}$  соответственно. Для измерения содержания  $\text{CO}_2$  в ДК АИА использовался квадрупольный масс-спектрометр. Газовая смесь откачивалась из ДК АИА со скоростью  $0.01 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$  [4].

Схема соединения масс-спектрометра с ДК АИА представлена на рис. 1. Время задержки сигнала масс-спектрометра по отношению к изменению концентрации газовой смеси на входе в капилляр составляло не более  $20 \text{ s}$ . В этом случае по своим аналитическим

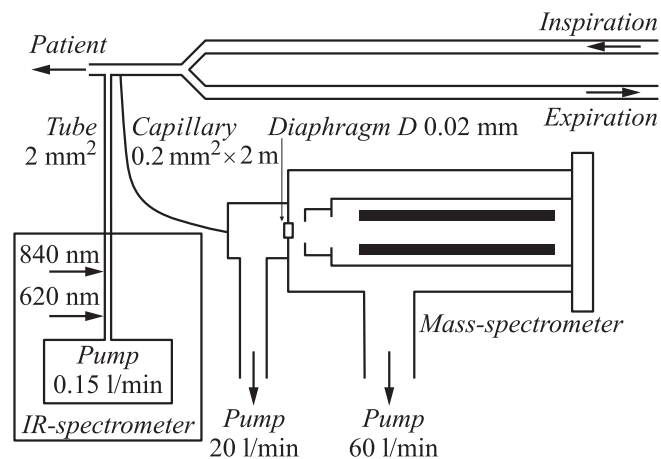


Рис. 1. Схема соединения масс-спектрометра с ДК АИА.

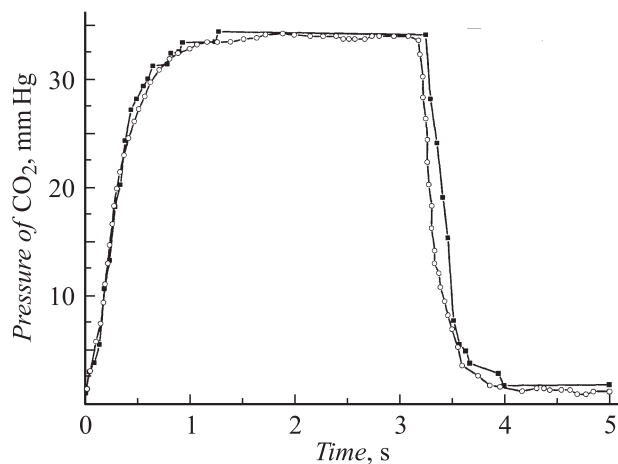


Рис. 2. Временная капнограмма (■ — ИК-спектрометр, ○ — масс-спектрометр).

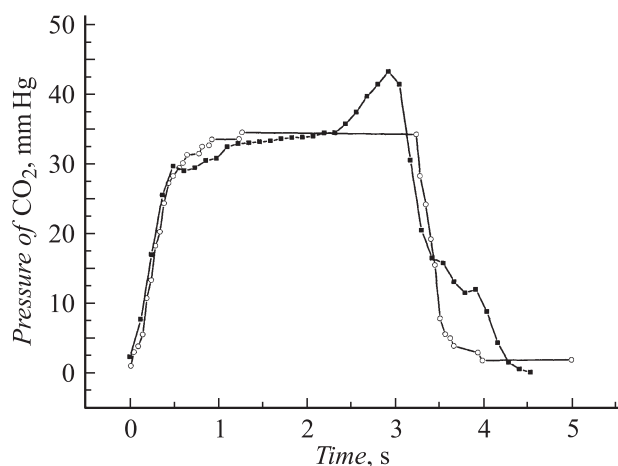


Рис. 3. Временная капнограмма (○ — ИК-спектрометр, ■ — масс-спектрометр).

возможностям масс-спектрометр является идеальным капнографом.

На рис. 2 представлены две капнограммы, полученные при помощи масс-спектрометра и ИК-спектрометра, принцип действия которого основан на поглощении излучения двух светодиодов, обеспечивающих излучение длиной волны 640 и 820 nm соответственно [5]. Представленные капнограммы практически полностью совпадают между собой. С учетом разницы в цене масс-спектрометра и ИК-спектрометра использование последнего делается привлекательным для использования в клиниках.

В настоящей работе проведены исследования работы масс-спектрометра в качестве капнографа на большом количестве операций (20 шт). Нами были зарегистрированы случаи (20% от общего числа наблюдений), когда показания масс-спектрометра и ИК-спектрометра не совпадали. Такое отклонение представлено на рис. 3. Этот результат может быть объяснен недостатками модели,

которая аппаратным образом корректирует показания ИК-спектрометра. Природа „выбросов“, обнаруженных нами на капнограмме, может быть связана как с завершением действия миорелаксантов (мышечных релаксантов), так и с различными другими дыхательными патологиями, которые требуют дополнительных исследований.

Масс-спектрометр в наших исследованиях использовался как в качестве капнографа, так и для измерения содержания ингаляционного анестетика в ДК АИА. Отметим, что создание ИК-спектрометра для ингаляционного анестетика севофлурана является исключительно сложной задачей ввиду того, что полоса поглощения севофлурана находится в области  $10\ \mu\text{m}$  [6], где малогабаритные источники излучения имеют низкую интенсивность излучения, недостаточную для обеспечения работы ИК-спектрометра с временным разрешением не менее 500 ms. В случае масс-спектрометра измерение содержания севофлурана ( $\text{C}_4\text{H}_3\text{F}_7\text{O}$ ) может осуществляться по интенсивности пика  $m/z = 199$ , соответствующего однократной ионизации электронным ударом. Используемая энергия электронов — 70 eV.

Вид зависимости содержания севофлурана в режиме „вдох–выдох“ с момента индукции в анестезию до выхода из нее представлен на рис. 4. Задержка показаний оптического датчика к сигналу от масс-спектрометра составляла не менее 10 min, что в критических ситуациях неприемлемо. Динамичное изменение амплитуды содержания севофлурана на вдохе и выдохе, измеренное масс-спектрометром, показывает тенденцию к ее уменьшению к концу операции в 3 раза, что не было зарегистрировано оптическим датчиком.

Анализ содержания севофлурана в режиме „вдох–выдох“ соответствует „перевернутой“ капнограмме и может служить индикатором действия миорелаксантов на организм. Появление „зубцов“ является показателем завершения действия релаксанта в 50% случаев. После ввода миорелаксанта (в наших исследованиях это был

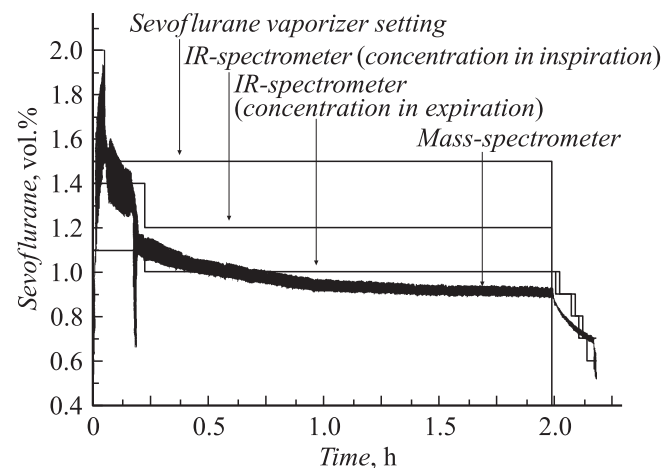
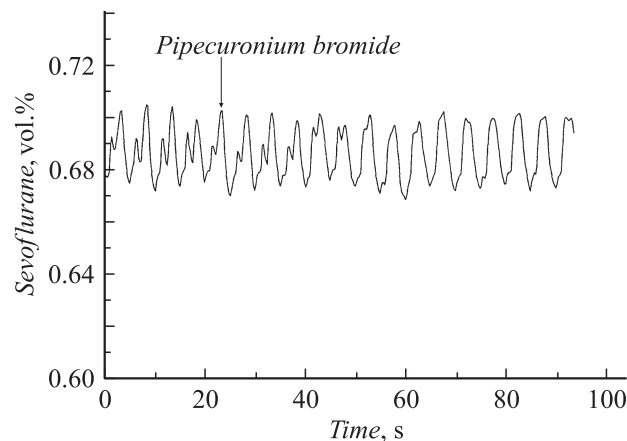


Рис. 4. Временная зависимость содержания севофлурана по показаниям испарителя, масс-спектрометра и ИК-спектрометра.



**Рис. 5.** Временная зависимость содержания севофлурана по показаниям испарителя, масс-спектрометра до и после введения миорелаксанта.

pipercuronium bromide: 2b,16b-бис (4-диметил-1-пиперазино) 3a,17b-диацетокси-5-а-андростана дибромид) происходит сглаживание кривой содержания анестетика.

На рис. 5 представлены измерения концентрации севофлурана до и после введения препарата pipercuronium bromide.

В работе продемонстрированы преимущества в использовании масс-спектрометра как капнографа и его новые возможности для анализа газов, присутствующих в ДК АИА, а так же неинвазивного динамического контроля эффективности миорелаксации во время операции.

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры нейтрохирургии и кафедры анестезиологии и реаниматологии ВМА им. С.М. Кирова за содействие в проведении клинических исследований.

## Список литературы

- [1] *Huffman L.M., Riddle R.T.* // *Anesthesiology*. 1987. Vol. 66. N 3. P. 439–440.
- [2] *Царенко С.В.* Нейрореаниматология. М.: МЕДИЦИНА, 2009. 383 с.
- [3] *Левшанков А.И.* Анестезиология и реаниматология. СПб: Спецлит., 2006. 847 с.
- [4] *Елохин В.А., Еришов Т.Д., Левшанков А.И., Николаев В.И., Сайфуллин М.Ф., Елизаров А.Ю.* // *ЖТФ*. 2010. Т. 80. Вып. 8. С. 156–158.
- [5] <[http://www.draeger.ru/MTms/internet/site/MS/internet/RU/ms/lib/Brochures/Anesthesia\\_Workstation/int\\_lib\\_broch\\_anesth.jsp](http://www.draeger.ru/MTms/internet/site/MS/internet/RU/ms/lib/Brochures/Anesthesia_Workstation/int_lib_broch_anesth.jsp)>
- [6] *Zhou H., Zhang W., Wu Z.* US Patent 20070220951A1.