

## ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА И КИСЛОРОДА В ДИФФУЗИОННОМ РЕСПИРАТОРЕ НА ОСНОВЕ ТРЕКОВЫХ МЕМБРАН

*И. А. Крячко, С. И. Тютюнников, В. Н. Шаляпин*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Приводятся результаты работы по измерению концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  в шланге вдоха и в подмасочном пространстве диффузионного респиратора с использованием атомно-эмиссионного спектрометра. Система газообмена данного респиратора эффективно, в течение 1 мин, восстанавливает концентрацию кислорода во вдыхаемом воздухе с 18,5 об. % до уровня его концентрации в атмосфере (21 об. %), и углекислого газа — с 2,9 об. % до стационарной концентрации, составляющей  $\sim 0,12$  об. %. В оптимальной конфигурации респиратора концентрация  $\text{CO}_2$  в подмасочном пространстве во время вдоха составляет 0,23 об. %. Временное разрешение метода — 200 мс, при этом предел детектирования  $\text{CO}_2$  — 0,08 об. %.

Results of the work on the measurement of concentration of  $\text{CO}_2$  and  $\text{O}_2$  in a hose of a breath and in undermask space of the diffusion respirator with the use of an atomic-emission spectrometer are represented. The system of gas exchange of the given respirator effectively, within 1 min, restores the concentration of oxygen in inhaled air from 18.5 vol. % up to a level of its concentration in atmosphere (21 vol. %), and carbonic gas — from 2.9 vol. % up to the stationary concentration, which is  $\sim 0.12$  vol. %. In an optimum configuration of the respirator, the concentration of  $\text{CO}_2$  in undermask space during a breath is 0.23 vol. %. The time resolution of the method is 200 ms and at the same time a limit of detecting of  $\text{CO}_2$  — 0.08 vol. %.

PACS: 39.30. +W, 07.60.Rd

### ВВЕДЕНИЕ

Во ФГУП «ИЦПЯФ» Росатома был создан диффузионный респиратор на основе трековых мембран, как средство индивидуальной защиты органов дыхания человека от радиоактивных аэрозолей, аэрозолей биологического происхождения, различной пыли, микроэлементов [1, 2]. Для исследования эффективности очистки воздуха от  $\text{CO}_2$  в респираторе было предложено использовать атомно-эмиссионный спектрометр на основе одноэлектродного импульсного ВЧ-разряда [3], уже хорошо зарекомендовавший себя в измерениях по контролю состава атмосферы в так называемых «чистых комнатах» (с системой очистки, основанной на трековых мембранах) [4]. Излучение атомов исследуемых газов, вводимых в разряд, простирается в широкой области спектра, что позволяет одновременно проводить измерения концентраций различных газов. Подобный спектрометр, обладая малой инерционностью, в то же время позволяет проводить измерения высокой точности, что наглядно демонстрируют результаты данной работы.

### 1. СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 1 представлена упрощенная схема диффузионного респиратора.

Конструктивно диффузионный респиратор состоит из внешнего 15 и внутреннего 16 контуров, разделенных газообменным модулем из трековых мембран 2. Через внешний контур производится принудительная прокачка атмосферного воздуха 5 при помощи системы вентиляции 3. Воздух из дыхательной маски 10, входящей в состав внутреннего контура, по воздуховоду 8 поступает в газообменный модуль 4, где в процессе диффузии через поры трековых мембран осуществляется удаление избыточного углекислого газа. Дыхательный мешок 9 служит для накопления очищенного от  $\text{CO}_2$  воздуха. Перегородка 1 разделяет потоки очищенного и неочищенного воздуха. Из газообменного модуля воздух по воздуховоду 7 подается в маску респиратора. Клапаны 11 и 12 препятствуют образованию обратного потока воздуха. Модификация диффузионного респиратора содержит газовую турбину 6, служащую для создания принудительной циркуляции воздуха во внутреннем контуре. Забор воздуха для измерений производился через специальные отверстия в шланге вдоха 14 и в подмасочном пространстве 13.

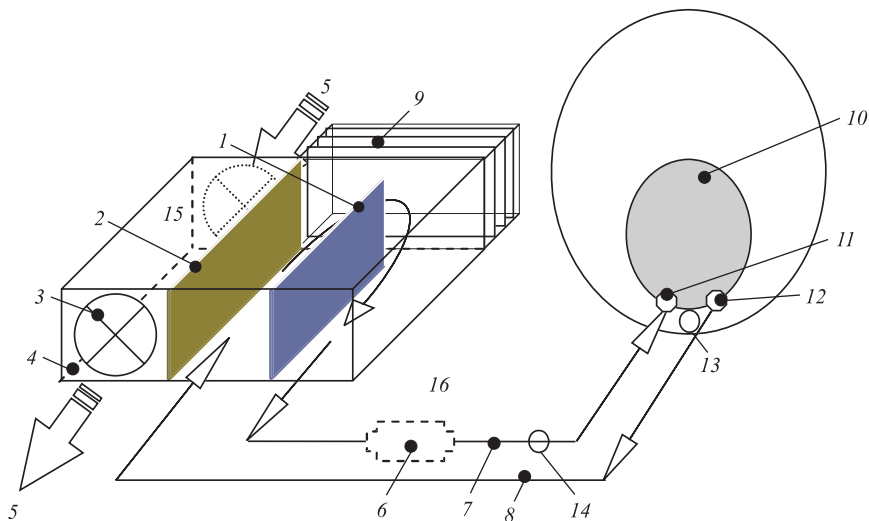


Рис. 1. Схема диффузионного респиратора

На рис. 2 представлена схема измерения концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  с использованием атомно-эмиссионного спектрометра на основе импульсного ВЧ-разряда (АЭС ИВЧ) [4]. В результате высокой скорости потока рабочего газа (аргона) в главной «магистрале» 1, в области ее стыка с капилляром 2, соединенным с точкой забора воздуха 3, создается разрежение (давление меньше атмосферного). Данное разрежение приводит к автоматическому отбору воздуха из диффузионного респиратора. Получившаяся в результате смесь аргона и воздуха поступает в горелку 4 ВЧ-генератора 5 АЭС ИВЧ. Излучение молекул газа, возбужденных разрядом, собирается кварцевым конденсором 6 на шель световода 7, по которому поступает в оптический спектрометр 8 (SOLAR ТП S150-2-3648 USB [5]), где и происходит анализ этого излучения. Спектрометр состоит из двух спектрографов на дифракционных решетках с суммарной рабочей областью 228–733 нм и разрешением

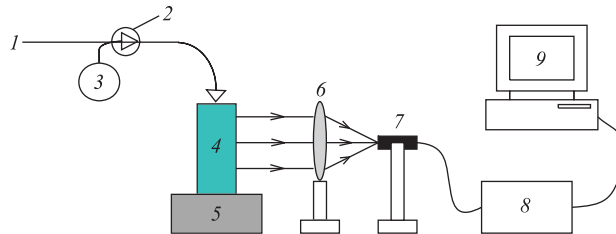


Рис. 2. Схема эксперимента

до 0,3 нм и ПЗС-линейки. Данные анализа поступают на ПК 9. Калибровка аппаратуры по объемным концентрациям  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  производится при помощи интегрального детектора газов (G750 POLYTECTOR II [6]), который в свою очередь был прокалиброван по чистому  $\text{CO}_2$  (99,9 об. %) из баллона.

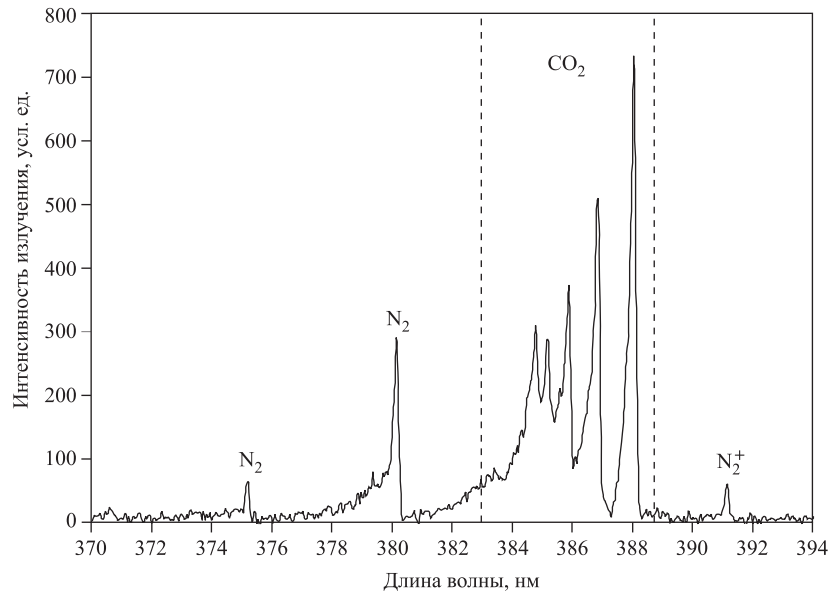


Рис. 3

На рис.3 показан пример спектра излучения в интервале от 370 до 394 нм, где выделяется молекулярная система полос, определяющая содержание углекислого газа при его концентрации 5 об. %. Остальные пики соответствуют излучению молекулярного азота при концентрации 74 об. %. Время накопления сигнала 200 мс.

## 2. ВРЕМЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ МЕТОДА

Одним из основных условий проведения измерений было временное разрешение не хуже 0,5 с.

Для изучения разрешающей способности (по времени) была проведена серия экспериментов по стабильности ВЧ-разряда и по скорости его реакции на изменение концентрации  $\text{CO}_2$ .

На рис. 4 показаны колебания максимума полосы, определяющей содержание углекислого газа при его концентрации 27 об. %. Временное разрешение — 8 мс. Данные периодические колебания ( $T = (79 \pm 8)$  мс или  $\nu = (12,7 \pm 1,3)$  Гц), по-видимому, обусловлены

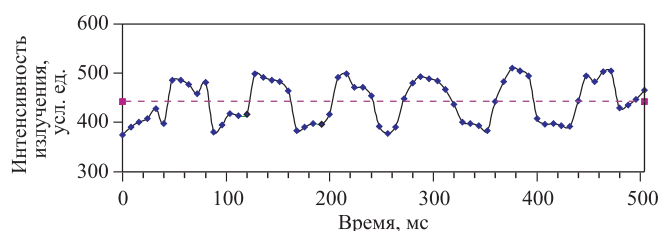


Рис. 4. Нестабильность плазменного разряда на примере интенсивности максимума молекулярной полосы 388 нм при 27 об. %  $\text{CO}_2$  в воздухе (разрешение 8 мс)

пульсацией высокого напряжения на аноде лампы ВЧ-генератора. Таким образом, периодическая нестабильность разряда составила 11 об. %, однако при временном разрешении хуже 0,1 с ее можно считать несущественной по сравнению с фоновым освещением в лаборатории и погрешностями регистрирующей аппаратуры (спектрометра).

На рис. 5 представлена временная характеристика переходного процесса в плазменном разряде при напуске атмосферного воздуха, содержащего 13 об. %  $\text{CO}_2$ . Время,

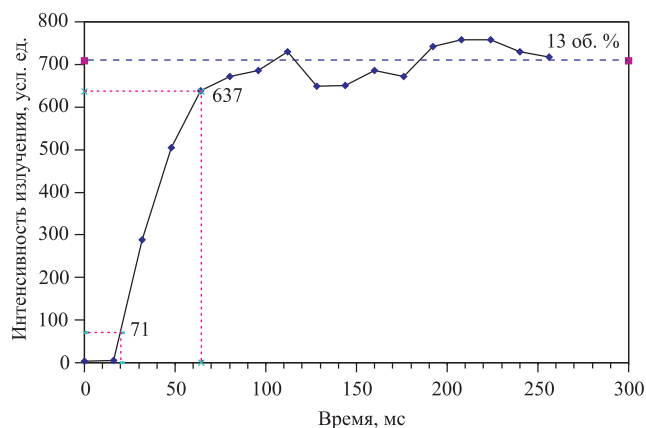


Рис. 5. Временная характеристика переходного процесса в плазменном разряде, при напуске атмосферного воздуха, содержащего 13 об. %  $\text{CO}_2$  (разрешение 16 мс)

необходимое разряду для реакции на такое изменение в поступающей газовой смеси:  $(50 \pm 20)$  мс. Под временем реакции здесь понимается время, за которое интенсивность сигнала растет от 0,1 до 0,9 от максимальной интенсивности. В измерениях характеристик респиратора содержание углекислого газа не превышало 5 об. %, следовательно, можно утверждать, что время реакции разряда в этих измерениях не превышает 50 мс.

Исходя из этих данных, можно говорить о возможности измерения концентраций  $\text{CO}_2$ , превышающих 10 об.%, с временным разрешением не хуже 100 мс. Однако для уверенного измерения концентраций углекислого газа меньше 1 об.% было необходимо увеличение времени накопления сигнала спектрометром. Поэтому было решено проводить измерения с временным разрешением не меньше 200 мс (пример с 5 об.%  $\text{CO}_2$  приведен на рис. 3).

Предел детектирования углекислого газа определялся по формуле, принятой для оценок подобных пределов в индуктивно-связанной плазме [7]:

$$D_L = 3\sigma C/I_n, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение уровня шумов;  $C$  — концентрация измеряемого элемента;  $I_n$  — интенсивность чистого сигнала (за вычетом фона). Расчет по этой формуле показал, что предел обнаружения  $\text{CO}_2$  составляет 0,08 об.% (для данного временного разрешения).

В перспективе переход от лампового к полупроводниковому генератору и доработка систем подвода питания генератора позволят проводить более точные и быстрые измерения концентрации  $\text{CO}_2$  и других газов за счет избавления от эффекта пульсации высокого напряжения и увеличения мощности генератора.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ В ШЛАНГЕ ВДОХА

Вначале исследовалась эффективность системы газообмена. С этой целью контролировалась концентрация кислорода  $\text{O}_2$  и  $\text{CO}_2$  во вдыхаемом воздухе (в шланге вдоха). Оператор дышал через маску респиратора без включения системы газообмена, затем через некоторое время включалась система газообмена. Дыхание оператор совершал равномерно и без нагрузки. Для того чтобы динамика дыхания оператора не оказывала существенного влияния на результаты измерений, было решено ограничиться временным разрешением не лучше 10 с.

На рис. 6 и 7 представлены результаты измерений.

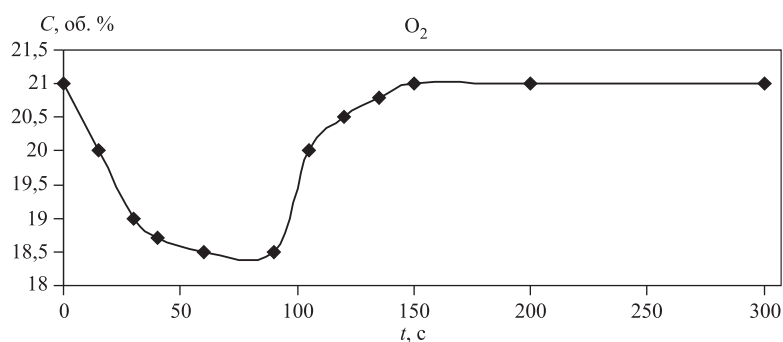


Рис. 6

Концентрация кислорода уменьшается с 21 до 18,5 об.% за 1,5 мин. После включения системы газообмена в момент времени  $t = 90$  с концентрация кислорода восстанавлива-

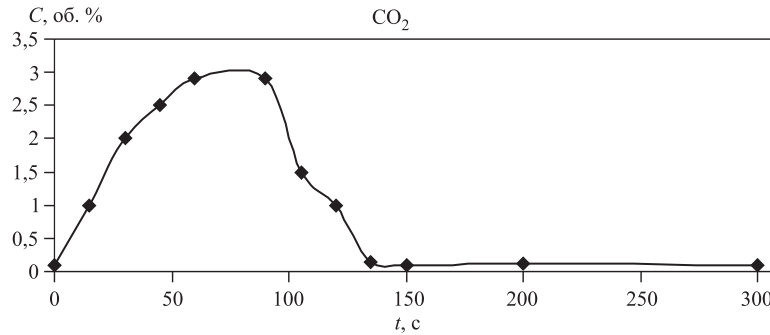


Рис. 7

ется до уровня атмосферного значения 21 об. % в течение 1 мин. Точность измерений — 0,5 об. %.

Концентрация  $\text{CO}_2$  во вдыхаемом воздухе увеличивается с 0,15 об. % (точность измерений 30 об. %) до 2,9 об. % (точность измерений 3 об. %) за 1,5 мин при выключенной системе газообмена. При включении системы газообмена, в момент времени  $t = 90$  с, концентрация  $\text{CO}_2$  восстанавливается до уровня 0,15 об. % в течение 1 мин.

Проводились также долговременные измерения стационарных концентраций  $\text{O}_2$  и  $\text{CO}_2$  в штатном режиме (при включенном газообмене) в течение 1 ч. Дыхание оператора также было равномерное и без нагрузки. Результаты измерений представлены на рис. 8, 9.

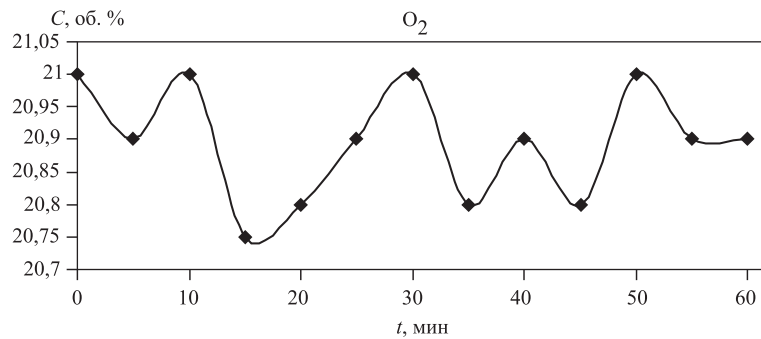


Рис. 8

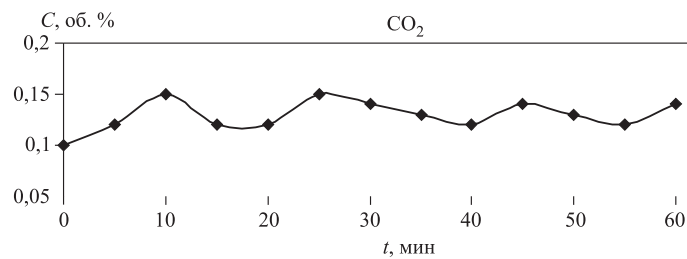


Рис. 9

Концентрация кислорода сохраняется на уровне его концентрации в атмосфере (21 об. %) в течение 1 ч в пределах точности измерений 0,5 об. %.

Концентрация углекислого газа колеблется от 0,1 до 0,15 об. % (точность измерений 10 об. %) при уровне его концентрации в лаборатории ( $0,06 \pm 0,01$ ) об. %.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ В ПОДМАСОЧНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Измерения в подмасочном пространстве производились в трех различных конфигурациях респиратора: 1) стандартная (только клапаны); 2) клапаны + турбинка; 3) турбинка (клапаны удалены). Система газообмена (продувка воздуха через внешний контур) была включена во всех конфигурациях. Дыхание оператор совершал равномерно и без нагрузки.

Контролировалась концентрация  $\text{CO}_2$  в подмасочном пространстве для нахождения оптимального сочетания компонентов респиратора с точки зрения максимально быстрого удаления углекислого газа из этого пространства. Результаты такого контроля необходимы, так как одним из существенных для нормального дыхания параметров является концентрация углекислого газа во вдыхаемом воздухе, а подмасочное пространство является «паразитным» объемом, из которого воздух, оставшийся там после выдоха, может смешиваться с очищенным воздухом, поступающим от системы газообмена.

На рис. 10 показана временная развертка участка спектра от 377 до 389 нм (при стандартной конфигурации респиратора), на которой отчетливо видно периодическое изменение интенсивности серии полос, характеризующих содержание  $\text{CO}_2$  на фоне по-

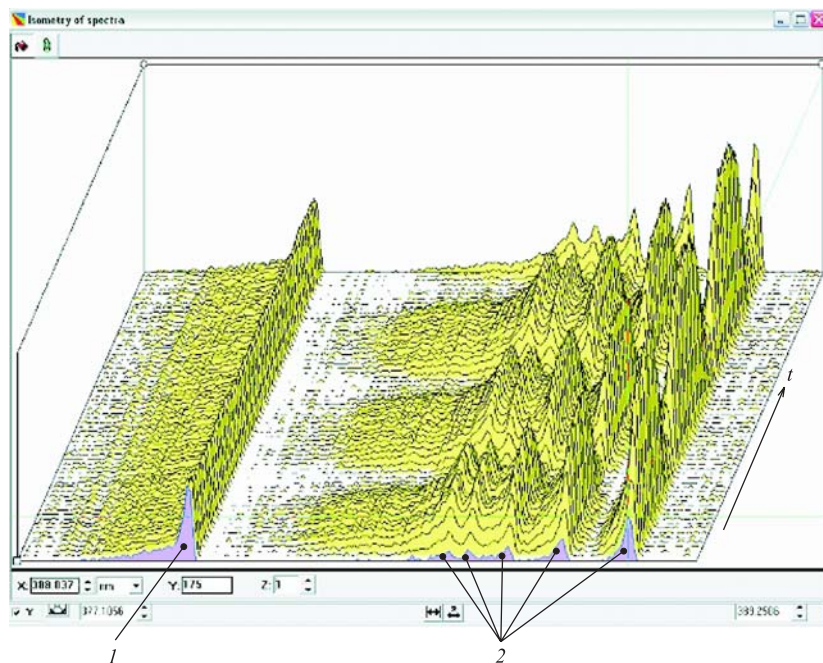


Рис. 10. Клапаны без турбинки: 1 — полоса  $\text{N}_2$ , характеризующая стабильность разряда (монитор); 2 — система полос, определяющая содержание  $\text{CO}_2$

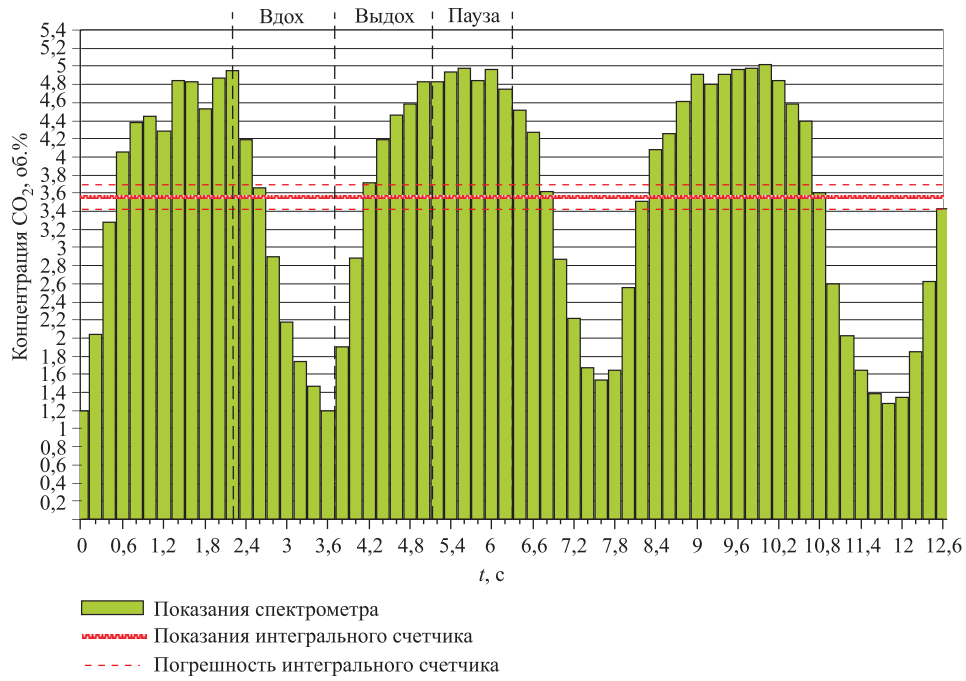


Рис. 11. Клапаны без турбинки

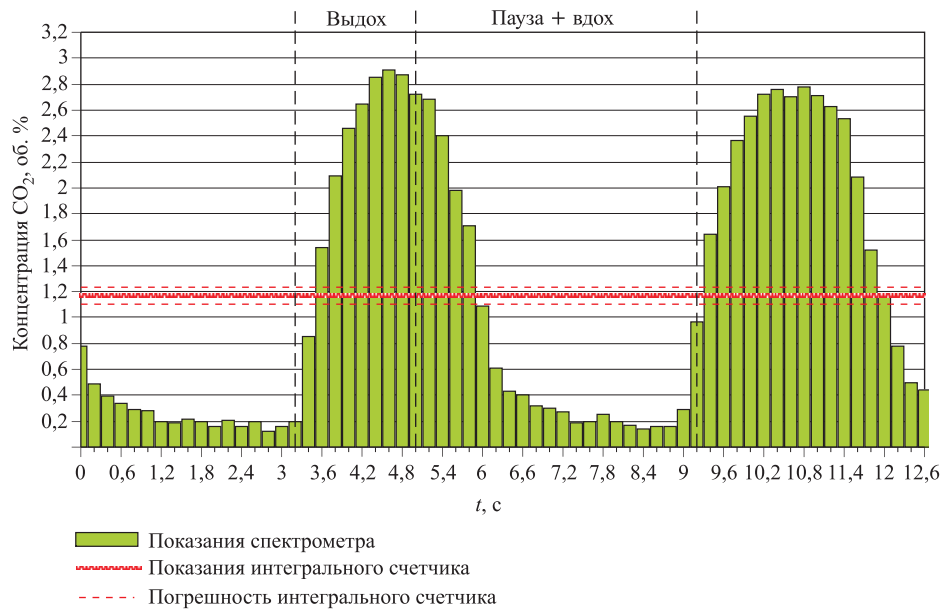


Рис. 12. Турбинка и клапаны





Рис. 13. Турбинка без клапанов

стоянной интенсивности полосы молекулярного азота. Временной промежуток, показанный на диаграмме, составляет 12,6 с (по направлению  $t$ ).

На рис. 11–13 представлены диаграммы зависимости концентрации углекислого газа от времени в подмасочном пространстве в процессе дыхания для различных модификаций респиратора. Измерения проводились на длине волны 388 нм (точка с наибольшей интенсивностью в системе полос молекулярного спектра, определяющего концентрацию CO<sub>2</sub>).

Относительная погрешность измерений не превышала 13 % и включала в себя погрешность интегрального детектора CO<sub>2</sub> и нестабильность ВЧ-разряда, которая определялась по максимуму полосы азота (380 нм, см. рис. 10).

Хорошо заметно, что добавление турбинки в конструкцию респиратора резко сокращает концентрацию углекислого газа в подмасочном пространстве и облегчает процесс дыхания, что выражается в снижении частоты дыхания оператора по сравнению со стандартной конфигурацией.

## 5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Дыхание, не контролируемое сознательно, состоит из трех циклически повторяющихся фаз: вдоха, выдоха и паузы (после выдоха). Так как наибольший интерес для данной работы представляет содержание диоксида углерода в подмасочном пространстве в процессе вдоха, то возникает необходимость определения временных границ этой фазы дыхания.

Для системы, содержащей одни лишь клапаны, длительность вдоха определяется с достаточно хорошей точностью, так как поступление в маску респиратора очищенного воздуха начинается лишь в начале фазы вдоха, а конец фазы, соответственно, определяется по началу роста концентрации углекислого газа (началу выдоха) (рис. 11). В результате фаза вдоха в данном случае составила  $(1,5 \pm 0,1)$  с, фаза выдоха —  $(1,2 \pm 0,1)$  с, а полный цикл —  $(3,9 \pm 0,2)$  с (или частота дыхания  $(15,4 \pm 0,8)$  мин<sup>-1</sup>).

К сожалению, в модификациях с турбинкой разделение фаз «пауза» и «вдох» затруднено из-за постоянной циркуляции воздуха во внутреннем контуре и, как следствие, непрерывной очистки подмасочного пространства респиратора (рис. 12, 13). Однако, предполагая неизменность временных долей каждой фазы в цикле дыхания в небольшом частотном диапазоне, а также учитывая известные времена полного цикла и фазы выдоха, можно оценить длительность остальных фаз.

На рис. 14–16 представлены зависимости содержания CO<sub>2</sub> от максимального до минимального значений в промежуток времени, за который происходит вдох (только клапаны) и пауза + вдох (для случаев с турбинкой).

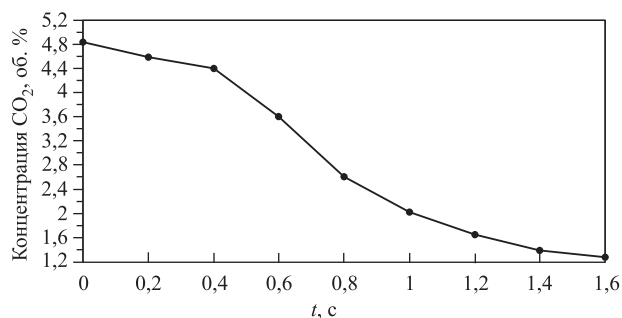


Рис. 14. Клапаны без турбинки

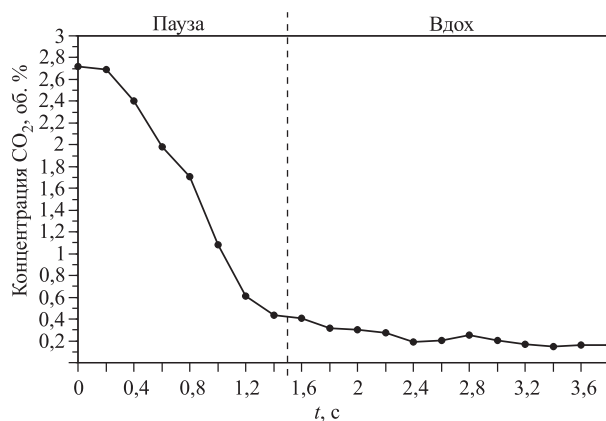


Рис. 15. Турбинка и клапаны

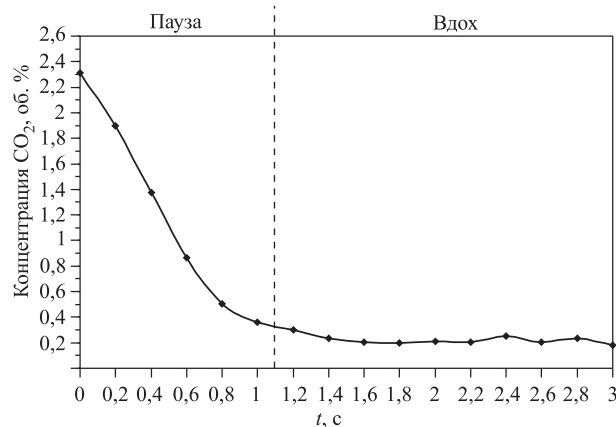


Рис. 16. Турбинка без клапанов

Детально разберем лишь случай «клапаны и турбинка» (для случая «турбинка без клапанов» расчет аналогичен).

Из полученных данных известно, что в этом случае фаза выдоха составила  $(1,7 \pm 0,1)$  с, а полный цикл  $(6,0 \pm 0,2)$  с (частота  $(10,0 \pm 0,3)$  мин<sup>-1</sup>). Сопоставив эти цифры с результатами стандартной конфигурации, получим согласующиеся коэффициенты подобия:  $(1,54 \pm 0,13)$  — для полного цикла и  $(1,4 \pm 0,2)$  — для выдоха (т.е. для модификации «клапаны и турбинка» длительность полного цикла в  $(1,54 \pm 0,13)$  раза, а фазы выдоха в  $(1,4 \pm 0,2)$  раза больше, чем для стандартной конфигурации). Используя коэффициент для полного цикла, как обладающий лучшей точностью, получаем, что длительность фазы вдоха в случае «клапаны и турбинка»:  $(2,3 \pm 0,4)$  с. Зная это время и время окончания фазы вдоха, легко определить среднее содержание углекислого газа во время вдоха.

В таблице приведены усредненные концентрации углекислого газа в подмасочном пространстве в процессе вдоха и частота дыхания оператора при испытании разных модификаций.

Конфигурация респиратора	Усредненная концентрация CO <sub>2</sub> на вдохе, об. %	Частота дыхания оператора, мин <sup>-1</sup>
Клапаны без турбинки	$2,9 \pm 0,5$	$15,4 \pm 0,8$
Турбинка и клапаны	$0,23 \pm 0,04$	$10,0 \pm 0,3$
Турбинка без клапанов	$0,23 \pm 0,02$	$13,3 \pm 0,6$

Для сравнения содержание 0,25–1 об. % углекислого газа во вдыхаемом воздухе приводит к изменениям функции внешнего дыхания и кровообращения, а уже при концентрации выше 2 об. % появляется головная боль, затрудненное дыхание и раздражение верхних дыхательных путей [8].

Согласно санитарным нормам объемное содержание двуокиси углерода в подмасочном пространстве подобных респираторов не должно превышать 1 об. % [9].

Частота дыхания оператора во всех случаях укладывается в диапазон, соответствующий частоте дыхания в состоянии покоя (8–20 мин<sup>-1</sup>) [10].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием атомно-эмиссионного спектрометра на основе одноэлектродного импульсного ВЧ-разряда были изучены рабочие характеристики диффузионного респиратора на основе трековых мембран. Исследования показали, что:

— временное разрешение метода не хуже 200 мс, при этом порог детектирования по  $\text{CO}_2$  составляет 0,08 об. %;

— система газообмена, с активной вентиляцией внешнего контура осуществляет поддержку в канале подачи воздуха стационарной концентрации  $\text{O}_2$  на атмосферном уровне ( $21,0 \pm 0,1$  об. %), а концентрации  $\text{CO}_2$  на уровне ( $0,12 \pm 0,03$ ) об. %;

— система газообмена способна в течение одной минуты после включения активной вентиляции внешнего контура восстановить концентрации кислорода и диоксида углерода в подаваемом в маску респиратора воздухе до стационарных при начальных концентрациях 18,5 и 3 об. % соответственно;

— использование дополнительной газовой турбинки в канале подачи воздуха приводит к уменьшению с 2,9 об. % (в стандартной конфигурации) до 0,23 об. % концентрации  $\text{CO}_2$  в подмасочном пространстве во время вдоха;

— при использовании подобной турбинки клапаны не оказывают существенного влияния на концентрацию углекислого газа в подмасочном пространстве во время вдоха.

Авторы выражают благодарность директору ФГУП «ИЦПЯФ» Росатома проф. В. Д. Шестакову за постановку задачи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковальчук М. В. и др. Газообменные диффузионные аппараты на трековых мембранах. Физические основы. Области применения // Проблемы биохимии, радиационной и космической биологии: Тр. Второго Междунар. симп. Дубна, 2001. Т. 1. С. 220–225.
2. Кузнецов В. И., Ковальчук М. В., Сисакян А. Н. Многоцелевые диффузионные стерилизующие респираторы // Проблемы биохимии, радиационной и космической биологии: Тр. Второго Междунар. симп. Дубна, 2001. Т. 1. С. 226–229.
3. Тоболкин А. С. // Патенты Российской Федерации. 1995. Т. 7. С. 223.
4. Самойлов В. Н., Тютюнников С. И., Шаляпин В. Н. Прототип атомно-эмиссионного спектрометра на основе одноэлектродного импульсного ВЧ-разряда для аналитических измерений // Письма в ЭЧАЯ. 2004. Т. 1, № 1(118). С. 58–67.
5. [http://solartii.com/spectral\\_instruments/s150-2.htm](http://solartii.com/spectral_instruments/s150-2.htm)
6. <http://www.ipi-inst.com.au/html/g750.html>
7. Winge R. K., Peterson V. J., Fassel V. A. // Applied Spectroscopy. 1979. V. 33, No. 3. P. 207.
8. Бандман А. Л. и др. Вредные химические вещества. Неорганические соединения элементов I–IV групп: Справ. изд. Л., 1988. С. 328–330.
9. Санитарно-эпидемиологические правила и нормы СанПиН 2.2.8.48-03. Средства индивидуальной защиты органов дыхания персонала радиационно опасных производств // Бюл. нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. 2003. (29 дек.). № 52. С. 59.
10. Коробков А. В., Башкиров А. А., Ветчинкина К. Т. Нормальная физиология: Учеб. М., 1980. С. 106.

Получено 27 сентября 2006 г.