

СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИОНИЗИРОВАННОГО ВОЗДУХА И АЭРОИОНОВ

С.В. Колерский, В.И. Добровольский, П.Н. Зубков, С.С. Колерская

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.

aeroions@vniiftri.ru

В работе рассмотрены электрические параметры ионизированного воздуха и аэроионов и средства воспроизведения и передачи размера единиц этих величин.

The paper discusses the electrical parameters of ionized air and air ions and instruments for the reproduction and transfer of the units of these quantities.

Ключевые слова: электрические параметры, ионизованный воздух, аэроионы

Измерения электрических параметров ионизированного воздуха и аэроионов вследствие их влияния на электрические, физико-химические и биологические процессы востребованы в медицине и здравоохранении, промсанитарии и охране труда, при использовании в военных технологиях, в промышленности, сельском хозяйстве и других отраслях. Аэроионы оказывают многостороннее влияние на организм человека, воздействуя на биохимические процессы и существенно изменяя электрообмен в организме. При попадании в организм через органы дыхания и кожу они запускают процесс перераспределения заряда между атомами, молекулами и клетками организма, вызывая различные механизмы ответных реакций, в частности нервно-рефлекторный, электрогуморальный, адапционный и катализирующий механизмы. Аэроионный состав воздуха влияет на вегетативные, анимальные и другие функции организма. Недостаток аэроионов приводит к снижению общего тонуса, сонливости, потере аппетита, в то время как их избыток приводит к головным болям, повышению артериального давления и другим отрицательным последствиям. Оптимальными для качественного состава воздуха являются концентрации от $5 \cdot 10^8$ до $1 \cdot 10^{10}$ м⁻³, которые наблюдаются в санаторно-курортных зонах.

Средства измерений счетной концентрации аэроионов используют при эксплуатации аэроионизирующего оборудования (аэроионизаторы медицинские, технологические, бытовые, аналитического приборостроения, системы автоматического регулирования аэроионного состава воздуха и др.), которое в большом количестве изготавливается и применяется в РФ и за рубежом. В частности, контроль аэроионного состава воздуха проводится при применении аэроионизаторов в медицине при лечении заболеваний верхних дыхательных путей, туберкулеза, сердечно-сосудистых заболеваний, невроза и других функциональных нарушений центральной нервной системы, аллергии; при реабилитации организма человека после перенесенных болезней, травм, чрезмерных нагрузок и истощения; в

процедурах аэроионотерапии больных с ожогами.

В России действуют санитарно-гигиенические нормативы, требующие проводить контроль аэроионного состава воздуха, например, государственный стандарт ГОСТ 12.0.003-74 [1] и гигиенические требования СанПиН 2.2.4.1294-03 [2], в которых нормируются счетная концентрация легких аэроионов (минимально допустимая и максимально допустимая) обеих полярностей, а также коэффициент униполярности (минимально допустимый и максимально допустимый), определяемый как отношение концентрации аэроионов положительной полярности к концентрации аэроионов отрицательной полярности. Условия труда при значениях нормируемых показателей, лежащих вне допустимых пределов, относятся к вредным. Аэроионный состав воздуха также нормируется различными ведомственными нормативными документами в России, например, СанПиН 2.1.3.2630-10 [3], СТО РЖД 1.15.003-2008 [4], СанПиН 2.5.1.2423-08 [5] и другими. Подобные нормативы существуют и за рубежом например, в Японии действует промышленный стандарт, определяющий нормы содержания ионов в воздухе и метод измерения счетной концентрации ионов.

Основными электрическими параметрами ионизированного воздуха являются:

– полярная объемная плотность электрического заряда (полярная ОПЭЗ) определенной (положительной или отрицательной) полярности, т. е. количество электрического заряда определенной полярности в единице объема воздуха;

– объемная плотность электрического заряда (ОПЭЗ) – скалярная величина, характеризующая распределение электрического заряда в пространстве, равная пределу отношения электрического заряда, содержащегося в объеме вещества, к объему этого элемента, когда объем и все размеры этого элемента стремятся к нулю [6]. ОПЭЗ численно равна алгебраической сумме положительной и отрицательной полярных ОПЭЗ;

– счетная концентрация аэроионов – количество аэроионов в единице объема, численно равная отношению полярной ОПЭЗ к среднему заряду аэроионов; наиболее часто эту характеристику используют для описания легких аэроионов, средний заряд которых равен одному элементарному заряду;

– электрическая подвижность носителей заряда – величина, равная отношению дрейфовой скорости, приобретенной ими в электрическом поле, к напряженности этого поля.

Полярная удельная электрическая проводимость воздуха (УЭПВ) является интегральной электрической характеристикой среды, в частности, воздушной, и равна отношению плотности электрического тока проводимости к напряженности электрического поля, вызывающего этот ток

Альманах современной метрологии, 2016, №6

[6]. Плотность ионного тока, вызванная направленным движением ионов в электрическом поле, зависит от концентрации аэроионов и их подвижности. Полярная УЭПВ описывается как

$$\lambda^+ = \int_0^{+\infty} k\rho(k)dk, \quad (1)$$

$$\lambda^- = \int_{-\infty}^0 k\rho(k)dk, \quad (2)$$

где λ^\pm – положительная или отрицательная полярная УЭПВ, $\rho(k)$ – ОПЭЗ заданной подвижности. Тот же интеграл, взятый в пределах от $-\infty$ до $+\infty$, описывает суммарную УЭПВ, равную сумме положительной и отрицательной полярной УЭПВ. УЭПВ измеряется в $\text{См}\cdot\text{м}^{-1}$, на практике чаще всего используется производная величина $\text{фСм}\cdot\text{м}^{-1}$. В атмосферном воздухе основной вклад в УЭПВ вносят легкие аэроионы с подвижностью от 0,5 до 2,5 $\text{см}^2\cdot\text{В}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$; тяжелые и ультратяжелые аэроионы ввиду их малой подвижности большой роли не играют.

Для обеспечения единства аэроионометрических измерений в РФ с 2010 г. функционирует Государственный первичный эталон объемной плотности электрического заряда ионизированного воздуха и счетной концентрации аэроионов ГЭТ 177-2010, созданный во Всероссийском научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ) на основе установки высшей точности для воспроизведения единицы полярной объемной плотности электрического заряда аэроионов УВТ 106-А—2004 [7] и разработок, приведенных в [8-12].

Принцип работы эталона основан на создании ионизированной воздушной среды сравнения с заданными параметрами с помощью генераторов аэроионов на основе радионуклидных источников и измерения параметров аэроионов методами аспирационного конденсатора (АК) и фильтра объемных зарядов (ФОЗ) с помощью специально изготовленных эталонных средств измерений, оснащенных высокочувствительными электрометрами и высокоточными средствами измерения объемного расхода воздуха [13].

Принцип действия АК заключается в пропускании через него исследуемого воздуха, подаче постоянного напряжения между обкладками и измерении величины ионного тока. Разность потенциалов между обкладками вызывает направленное движение ионов в сторону собирающей обкладки и осаждение на ней аэроионов, которые и обуславливают электрический ток в цепи (рис. 1). Интегральный АК представляет собой простейшую форму АК и состоит из двух обкладок: высоковольтной и собирающей.

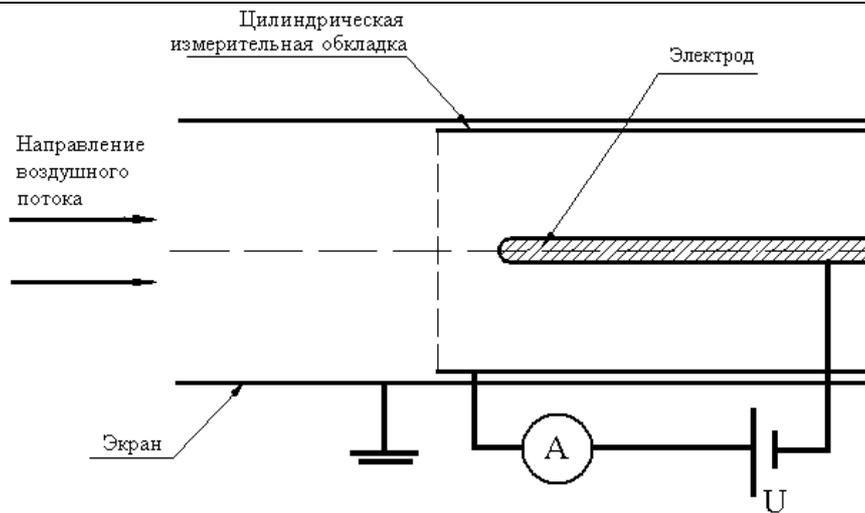


Рис. 1. Схема аспириционного конденсатора

Ток аэроионов через измерительную обкладку интегрального аспириционного конденсатора равен

$$I(k_0) = W \int_{k_0}^{\infty} \rho(k) dk + \frac{CU}{\varepsilon_0} \int_0^{k_0} \lambda(k) dk, \quad (3)$$

где W – объемный расход воздуха, C – емкость АК, U – разность потенциалов между обкладками АК, ε_0 – электрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$, k_0 – предельная подвижность АК, равная

$$k_0 = \frac{\varepsilon_0 W}{CU}. \quad (4)$$

Измерения счетной концентрации аэроионов проводятся при таких значениях расхода W и разности потенциалов U , при которых выполняется условие $k_0 < k_{\min}$, где k_{\min} – минимальная подвижность аэроионов, присутствующих в измеряемом воздухе. При выполнении этого условия второе слагаемое в формуле (3) обращается в ноль, а интеграл в первом слагаемом становится равным ρ . Обработка результатов производится по формуле (5):

$$\rho_c = \frac{I}{We}, \quad (5)$$

где ρ_c – счетная концентрация аэроионов, м^{-3} , I – сила ионного тока, А, W – объемный расход воздуха через АК, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ – элементарный заряд [14].

Измерения полярной УЭПВ проводятся при таких значениях расхода W и

разности потенциалов U , при которых выполняется условие $k_0 > k_{\max}$, где k_{\max} – максимальная подвижность аэроионов, присутствующих в измеряемом воздухе. При выполнении этого условия первое слагаемое в формуле (3) обращается в ноль, а интеграл во втором слагаемом становится равным λ^\pm . Обработка результатов производится по формуле (6):

$$\lambda = \frac{\varepsilon_0 \cdot I}{C \cdot U}. \quad (6)$$

В состав эталона ГЭТ 177-2010 входят:

– Две установки для генерирования ионизированного воздуха и измерения параметров аэроионов. Каждая из установок состоит из генератора аэроионов, средств измерений полярной ОПЭЗ, источников постоянного стабилизированного напряжения, расходомеров (газового счетчика «Метран-331» и ротаметра) и переходников от установки к выходу и входу системы подачи, очистки, подготовки и отбора воздуха.

Установка № 1 позволяет генерировать биполярные и униполярные ионы и проводить одновременные измерения проверяемым и контрольным счетчиком путем установки их в одинаковые трубопроводы из двух пар трубопроводов, каждая из которых позволяет проводить измерения в вертикальном или горизонтальном положении. Регулировка коэффициента униполярности и счетной концентрации легких аэроионов проводится путем регулирования напряжений, подаваемых на электроды генератора аэроионов. В состав установки также входят универсальный счетчик аэроионов УТ-8401 с источником постоянных малых токов ИТ-12, фильтры объемных зарядов и первичный преобразователь АК-1.

Установка № 2 служит для генерирования биполярных аэроионов, подаваемых только в горизонтальном направлении. Проверка счетчиков проводится не одновременно, а путем поочередных измерений контрольным и проверяемым счетчиком. Регулировка концентрации осуществляется дискретно с помощью источников ионизирующего излучения различной активности и заслонок с отверстиями разного размера. Возможна также подрегулировка концентрации с помощью электростатического осадителя на выходе генератора аэроионов.

– Эталонные средства измерений ОПЭЗ и полярной ОПЭЗ. Эталонные СИ состоят из первичных измерительных преобразователей, устройства отбора проб воздуха и электрометрических средств измерений (электрометры Keithley моделей 6517-А и 6430, вольтметры В7-46/1 и В7-34А, образцовый калибратор постоянного тока НК4-1).

Первичными преобразователями, применяемыми при отборе проб воздуха, являются АК и ФОЗ. АК служат для измерений полярной ОПЭЗ

ионизированного воздуха, ФОЗ – для измерений ОПЭЗ ионизированного воздуха.

На рис. 2 представлены некоторые АК, разработанные ФГУП «ВНИИФТРИ» и применяемые на ГЭТ 177-2010.

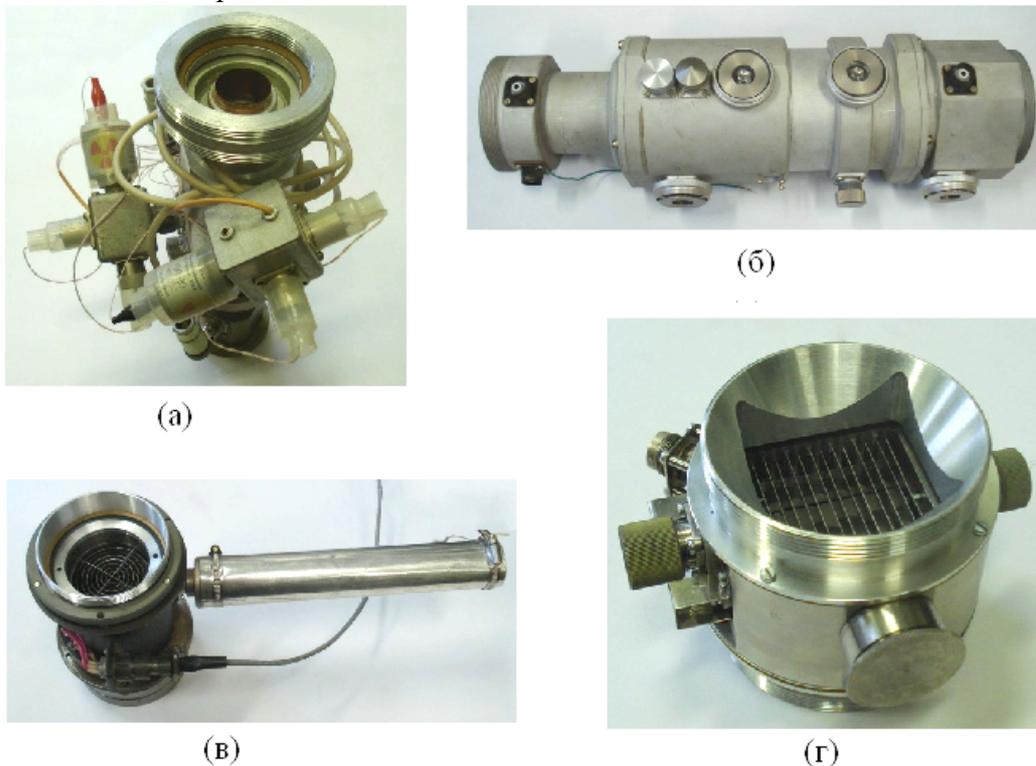


Рис. 2. Первичные преобразователи: (а) АК-1, (б) АК-2, (в) ИФ-1, (г) АК-4

АК-1 и АК-2 предназначены для измерения счетной концентрации легких аэроионов и УЭПВ. АК-1 работает при расходе воздуха от 60 до 140 л/мин, АК-2 – при расходе от 120 до 300 л/мин. Эти преобразователи применяются в режиме интегрального или дифференциального АК [14] в зависимости от подключения электрометра к той или иной собирающей обкладке. АК-2 укомплектован тремя сменными высоковольтными электродами с различными диаметрами, один из которых служит для измерения полярной ОПЭЗ легких и средних аэроионов, другой – для измерений распределения аэроионов по подвижностям, а третий – для измерений УЭПВ воздуха.

АК-3 по внешнему виду аналогичен АК-2 и предназначен в основном для измерений полярной ОПЭЗ средних и тяжелых аэроионов. Он состоит из двух последовательных АК, первый из которых предназначен для осаждения и измерения концентрации легких аэроионов, а второй (состоящий из четырех отдельных измерительных обкладок) – для

измерения полярной ОПЭЗ средних и тяжелых аэроионов и распределения их по подвижностям при расходах от 5 до 50 л/мин.

АК-4 предназначен для измерений больших концентраций легких аэроионов.

Ионные фильтры ИФ-1 и ИФ-2, представляющие собой цилиндрические фильтры Ганна, служат для измерений и пропускания легких ионов узкой струей в центре или между коаксиальными цилиндрами путем управления величиной напряжения на их электродах. Также ИФ-1, при подсоединении его на аспирационный вход АК-2, позволяет проводить измерения функции распределения счетной концентрации аэроионов по подвижностям в режиме дифференциального аспирационного конденсатора второго рода [14].

– Система подачи, очистки, подготовки и отбора воздуха. В состав системы входят газодувка ротационная типа 1Г21-50-4В, компрессор типа VS204-100Т, трубопроводы и аэрозольные фильтры. Очистка воздуха, поступающего от газодувки ротационной, осуществляется с помощью аэрозольных фильтров ФЯС-С, ФЯК и ФВК-100, а от компрессора – аэрозольными фильтрами FIAC FP 1000, FD 1000, FC 1000. Регулирование давления воздуха достигается с помощью стабилизаторов СДВ-25 и СДВ-6. Осушение воздуха осуществляется с помощью устройства осушки сжатого воздуха типа П-УОБ-2М. Система обеспечивает подачу воздуха с объемным расходом до 1000 л/мин и его очистку по 7 классу ИСО согласно [15].

– Вспомогательные устройства (радионуклидные аэроионизаторы, устройства сбора и обработки данных, индикаторы-электрометры, ионизационные источники тока ИИТ, кондиционер, стабилизатор напряжения СНФО-5).

ГЭТ 177-2010 воспроизводит и измеряет полярную ОПЭЗ (счетную концентрацию) легких аэроионов в диапазоне от $1,6 \cdot 10^{-2}$ до $200 \text{ нКл} \cdot \text{м}^{-3}$ ($1 \cdot 10^2 - 1,2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$), СКО $\leq 4 \%$, НСП $\leq 4 \%$, неопределенность измерений по типу А 2,1 %, по типу В 1,6 %, суммарная 2,7 %.

В 2013 и 2015 гг. во ФГУП «ВНИИФТРИ» разработаны поверочные установки – рабочие эталоны счетной концентрации легких аэроионов «РЭКЛА-1» и «РЭКЛА-1М», проведены испытания в целях утверждения типа с помощью ГЭТ 177-2010. Установки занесены в Государственный реестр средств измерений и внедрены в региональных ЦСМ.

ГЭТ 177-2010 используется для испытаний, поверки и калибровки аэроионометрической аппаратуры (счетчиков аэроионов, измерителей полярной удельной электрической проводимости воздуха) и испытаний аэроионизаторов.

Разрабатывается метрологическое обеспечение для средств измерений УЭПВ «Электропроводность-2М», поставляемых на станции наблюда-

тельной сети Росгидромета для измерений в диапазоне от 5 до 40 фСм·м⁻¹. За основу передачи размера единицы УЭПВ используются генераторы, разработанные ФГУП «ВНИИФТРИ», и измерители эталонные «Электропроводность-2Э».

Для развития обеспечения единства измерений аэроионометрической аппаратуры необходимо:

1. Расширение диапазона воспроизведения и измерения полярной объемной плотности электрического заряда ионизированного воздуха для аэроионов с подвижностью от $1 \cdot 10^{-4}$ до $0,5 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ в соответствии с ГОСТ 8.646–2008 [16].

2. Расширение функциональных возможностей эталона по воспроизведению и измерению полярной удельной электрической проводимости воздуха в диапазоне от $2,5 \cdot 10^{-15}$ до $1 \cdot 10^{-12} \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ с погрешностью, не превышающей 5 %, с целью обеспечения потребностей Росгидромета и промышленности, а также электрической подвижности аэроионов для задач аналитического приборостроения.

Литература

1. ГОСТ 12.0.003-74 Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
2. СанПиН 2.2.4.1294-03. Гигиенические требования к аэроионному составу воздуха производственных и общественных помещений. – М.: Минздрав России, 2003.
3. СанПиН 2.1.3.2630-10. Санитарно-эпидемиологические требования к организациям, осуществляющим медицинскую деятельность.
4. СТО РЖД 1.15.003-2008. Требования к условиям труда в ОАО «РЖД».
5. СанПиН 2.5.1.2423-08. Требования к условиям труда летного состава гражданской авиации.
6. ГОСТ Р 52002-2003 Электротехника. Термины и определения основных понятий.
7. Колерский С.В., Журавлев А.В., Карпов О.В., Колерская С.С., Мезрин М.Ю. Аппаратура для измерения и воспроизведения единицы объемной плотности электрического заряда ионизированного воздуха // Измерительная техника, 2009, № 7, с. 52-54.
8. Колерский С.В. О воспроизведении единицы объемной плотности электрического заряда ионизированного воздуха и аэрозоля // Измерительная техника, 1987, № 2, с. 53-54.
9. Колерский С.В. Методы и аппаратура для измерения электрических параметров аэроионов и высокодисперсных аэрозолей. Диссертация к.т.н., М.: ВНИИФТРИ, 1975.
- 10 Колерский С.В. Градуировка аспирационных счетчиков и спектрометров ионов // Методы и приборы контроля параметров биосферы. Л.: Альманах современной метрологии, 2016, №6

- ЛИАП, 1984, вып. 171, с. 3 – 6.
11. Борунова Е.П., В. Л. Докукина, Колерский С.В. Аэроионизатор на основе радионуклидов для градуировки аспирационных счетчиков ионов.- Методы и аппаратура для точных измерений параметров ионизирующих излучений/ Сб. научных трудов ВНИИФТРИ. М.: 1984, с. 72 – 77.
 12. Борунова Е.П., Колерский С.В. Генератор легких ионов // Исследования по вопросам измерения физических характеристик ионов и аэрозольных частиц// Ученые записки ТГУ, Тарту, вып. 195, 1967, с. 12 – 90.
 13. Карпов О.В., Колерский С.В., Журавлев А.В., Колерская С.С. Государственный первичный эталон единиц объемной плотности электрического заряда ионизированного воздуха и счетной концентрации аэроионов // Измерительная техника, 2011, № 1, с. 3-7.
 14. ГОСТ Р 8.845-2013 ГСИ. Измерения аэроионного состава воздуха. Метод измерений объемной плотности электрического заряда воздуха и счетной концентрации легких аэроионов на основе аспирационного конденсатора.
 15. ГОСТ ИСО 14644-1-2002 Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1. Классификация чистоты воздуха.
 16. ГОСТ Р 8.646-2008 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений объемной плотности электрического заряда ионизированного воздуха и счетной концентрации аэроионов.