

УДК 00691:537.56

ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ АЭРОИОНОВ

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

ФГУП «ВНИИФТРИ». Менделеево, Московская обл.

mera@vniiftri.ru

Дано описание средств передачи единиц измерений параметров аэроионов – счетной концентрации легких аэроионов и удельной электрической проводимости воздуха. Рассмотрены требования для уменьшения искажающих факторов при измерениях этих величин. Описаны завершённые и проводимые работы, направленные на обеспечение единства измерений в этой области

Ключевые слова: аэроионы, качество воздуха, аэроионный состав, счётная концентрация, удельная электрическая проводимость, счётчики аэроионов, поверка и калибровка средств измерений

Одним из показателей качества воздуха является его аэроионный состав. Интегральными параметрами аэроионного состава воздуха являются счетная концентрация легких аэроионов (СКЛА) и удельная электрическая проводимость воздуха (УЭПВ).

Счетная концентрация положительных или отрицательных легких аэроионов – количество аэроионов соответствующей полярности в единице объема воздуха. Единица измерения СКЛА в системе СИ – м^{-3} . Измерения СКЛА востребованы в медицине, сельском хозяйстве, промышленности, экологии, на объектах жизнедеятельности человека и животных, в области обороны и безопасности, санитарной эпидемиологии при аттестации рабочих мест, в различных технологиях и в быту. Известно многостороннее влияние СКЛА на здоровье человека [1]. СКЛА воздуха рабочих зон нормируется такими документами, как ГОСТ 12.0.003-74 [2] и СанПиН

2.2.4.1294-03 [3], а также рядом ведомственных нормативных документов. Поэтому обеспечение единства измерений этой величины является актуальным. В 2010 г. во ВНИИФТРИ был создан и функционирует Государственный первичный эталон единиц полярной объемной плотности электрического заряда и счетной концентрации аэроионов ГЭТ 177-2010 [4], возглавляющий Государственную поверочную схему ГОСТ Р 8.646-2008 [5].

УЭПВ – величина, характеризующая электропроводность воздуха, произведение которой на напряженность электрического поля равно плотности электрического тока проводимости [6]. Единица измерения УЭПВ в системе СИ – $\text{См} \cdot \text{м}^{-1}$. Измерения УЭПВ необходимы для оценки электрического состояния атмосферы и влияния на него антропогенных факторов, а также для метеорологического прогнозирования [7,8]. Измерения УЭПВ в приземном слое атмосферы проводятся посто-

янно как за рубежом, так и в РФ на наблюдательной сети Росгидромета в течение более 60 лет.

УЭПВ обусловлена наличием в воздухе электрического заряда и связана с его объемной плотностью уравнением

$$\lambda^{\pm} = \int_0^{\pm\infty} k \cdot \rho(k) dk,$$

где λ – УЭПВ, $\text{См} \cdot \text{м}^{-1}$;

k – подвижность аэроионов, $\text{м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$;

$\rho(k) dk$ – объемная плотность электрического заряда воздуха с подвижностью аэроионов от k до $k + dk$, $\text{Кл} \cdot \text{м}^{-3}$.

Для легких аэроионов счетная концентрация связана с полярной объемной плотностью электрического заряда воздуха отношением

$$\rho_c^{\pm} = \frac{\rho^{\pm}}{e},$$

где ρ_c^{\pm} – счетная концентрация положительных или отрицательных аэроионов, м^{-3} ;

$$\rho^{\pm} = \int_0^{\pm\infty} \rho(k) dk$$
 – полярная объ-

емная плотность электрического заряда воздуха (положительная или отрицательная), $\text{Кл} \cdot \text{м}^{-3}$;

$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ – элементарный заряд.

Средства измерений, входящие в Государственный первичный эталон ГЭТ 177-2010, применимы не только для измерения СКЛА, но и УЭПВ. Поэтому он может обеспечивать единство измерений этой вели-

чины. Воспроизведение единиц СКЛА и УЭПВ основано на создании среды сравнения (ионизированного воздуха) с заданными параметрами аэроионов и измерении этих параметров эталонным средством измерений. Среда сравнения создается с помощью радионуклидного генератора аэроионов, на вход которого подается обеспыленный и деионизированный воздух. Параметры аэроионов на выходе генератора регулируются путем применения источников ионизирующего излучения с различной активностью и изменением напряжения на электростатических осадителях, способных осаждавать часть аэроионов после их генерации.

Измерения СКЛА и УЭПВ на ГЭТ 177-2010 осуществляются методом интегрального аспирационного конденсатора (АК). Метод заключается в пропускании измеряемого воздуха между обкладками измерительного конденсатора, на одну из обкладок которого подается потенциал, а с другой измеряется ток осаждающихся на нее ионов. В общем виде вольт-амперная характеристика АК описывается уравнением

$$I(U) = W \int_{k_0}^{\infty} \rho(k) dk + \frac{CU}{\epsilon_0} \int_0^{k_0} \lambda(k) dk, \quad (1)$$

где W – объемный расход воздуха в аспирационном конденсаторе, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$;

k_0 – предельная подвижность аспирационного конденсатора, $\text{м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ – варьируемый параметр

АК, зависящий от напряжения между обкладками АК и объемного расхода воздуха в нем:

$$k_0 = \frac{\varepsilon_0 \cdot W}{C \cdot U}, \quad (2)$$

C – емкость аспирационного конденсатора, Ф;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$ – электрическая постоянная;

$\lambda(k)dk = k \cdot \rho(k)dk$ – УЭПВ, обусловленная аэроионами с подвижностью от k до $k + dk$, $\text{См} \cdot \text{м}^{-1}$.

Из формулы (1) следует, что при постоянном объемном расходе воздуха

$$\rho(k_1, k_2) = \frac{1}{W} \left[I(U_1) - I(U_2) - U_1 \frac{dI(U_1)}{dU} + U_2 \frac{dI(U_2)}{dU} \right] \quad (3)$$

$$\lambda(k_1, k_2) = \frac{\varepsilon_0}{C} \left[\frac{dI(U_2)}{dU} - \frac{dI(U_1)}{dU} \right], \quad (4)$$

где $\rho(k_1, k_2)$ – полярная объемная плотность электрического заряда аэроионов с подвижностями от k_1 до k_2 ;

U_1, U_2 – значения напряжения между обкладками аспирационного конденсатора, при которых предельная подвижность аспирационного конденсатора равна k_1 и k_2 соответственно (при постоянном объемном расходе воздуха);

$\lambda(k_1, k_2)$ – УЭПВ, обусловленная аэроионами с подвижностями от k_1 до k_2 .

Из формул (3) и (4) следуют формулы для расчета интегральных параметров СКЛА и УЭПВ:

$$\rho_c(0, \pm \infty) = \frac{I}{We}$$

при условии $k_0 < k_{\min}$, т. е. с

$$\text{учетом (2)} \quad W < \frac{k_{\min} \cdot CU}{\varepsilon_0};$$

$$\lambda(0, \pm \infty) = \frac{\varepsilon_0}{C} \cdot \frac{I}{U}$$

при условии $k_0 > k_{\max}$, т. е. с

$$\text{учетом (2)} \quad W > \frac{k_{\max} \cdot CU}{\varepsilon_0},$$

где k_{\min}, k_{\max} – нижняя и верхняя границы интервала подвижностей аэроионов, присутствующих в измеряемом воздухе. Для аэроионов возрастом более 0,01 с эти границы равны $k_{\min} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ и $k_{\max} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

В интервале предельных подвижностей АК $k_{\min} < k_0 < k_{\max}$ возможны измерения спектральных характеристик СКЛА и УЭПВ (распределение по подвижностям аэроионов) [10]. Измерения спектральных характеристик в данной статье не рассматриваются.

Для правильной работы измерительного конденсатора поток воздуха в нем должен быть ламинарным, т. е. объемный расход воздуха должен быть не меньше

$$W < W_{кр} = \frac{\text{Re}_{кр} \pi \nu (R + r)}{2},$$

где R – радиус внешней обкладки АК, м;

r – радиус внутренней обкладки АК, м;

$\nu = 1,51 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ – кинематическая вязкость воздуха;

v – средняя скорость потока воздуха через АК, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$;

$Re_{кр}$ – критическое значение числа Рейнольдса для ламинарного течения потока, равное 2300.

В случае отсутствия возможности выполнить это условие необходимо при расчете пределов погрешности измерителя учесть дополнительную погрешность, обусловленную турбулентным перемешиванием. Эта погрешность была оценена в работе [9]. Также необходимо учитывать дополнительную погрешность, обусловленную потерями аэроионов на рекомбинацию, диффузию и адсорбцию.

Другим условием правильной работы измерительного конденсатора является отсутствие в нем ионообразования под действием электрического поля. Для выполнения этого условия необходимо, чтобы напряженность поля в измерительном конденсаторе не превышала $10^5 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$.

В 2013 г. во ФГУП «ВНИИФТРИ» создан и внедрен в региональном ЦСМ рабочий эталон счетной концентрации легких аэроионов «РЭКЛА-1» [10]. Рабочий эталон позволяет проводить поверку счетчиков легких аэроионов в диапазоне от 10^2 до 10^6 см^{-3} , соблюдая прослеживаемость от рабочих средств измерений к Государственному первичному эталону согласно Государственной поверочной схеме [5]. В настоящее время ведутся работы по

созданию рабочих эталонов для других ЦСМ.

Задача обеспечения единства измерений УЭПВ в настоящее время только решается. В 2011 г. во ФГУП «ВНИИФТРИ» были проведены испытания в целях утверждения типа измерителя УЭПВ «Электропроводность-2», изготовленного ФГБУ «ГГО им. А. И. Воейкова». Испытания типа проводились методом прямого сличения показаний эталонного и испытываемого средств измерений.

В настоящее время во ФГУП «ВНИИФТРИ» проводятся работы по созданию рабочего эталона УЭПВ в диапазоне от 3 до 40 $\text{фСм} \cdot \text{м}^{-1}$ для ФГБУ «ГГО им. А. И. Воейкова». Область применения рабочего эталона налагает дополнительные ограничения на геометрические параметры измерительного конденсатора, поскольку передача единицы УЭПВ между СИ с сильно различающимися размерами аспирационного входа возможна лишь с большой погрешностью, обусловленной причинами аэродинамического характера. Поэтому необходимо подобрать режимные параметры измерительного конденсатора (U и W), удовлетворяющие условиям корректных измерений. Проведенные расчеты показали, что на основе измерителя «Электропроводность-2М» (усовершенствованного измерителя «Электропроводность-2») с подключенным к нему высокочувствительным электрометром возможно создание рабочего эталона УЭПВ с

диапазоном измерений от 3 до 40 $\text{фСм}\cdot\text{м}^{-1}$ и пределом относительной погрешности измерений УЭПВ, не превышающим 15 – 25 %.

К настоящему времени задача передачи размера единицы СКЛА рабочим средствам измерений решена [11]. Задача передачи размера УЭПВ решается в настоящее время в рамках хоздоговорных работ.

Литература

1. Чижевский А.Л. Аэроионификация в народном хозяйстве. М.: Стройиздат, 1989. 488 с.
2. ГОСТ 12.0.003-74. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
3. СанПиН 2.2.4.1294-03. Гигиенические требования к аэроионному составу воздуха производственных и общественных помещений.- М.: Минздрав России, 2003.
4. Карпов О.В. и др. Государственный первичный эталон единиц объемной плотности электрического заряда и счетной концентрации аэроионов// Измерительная техника, №1, с. 3-7.
5. ГОСТ Р 8.646-2008 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений плотности электрического заряда ионизированного воздуха.
6. ГОСТ Р 52002-2003. Электротехника. Термины и определения основных понятий.
7. Шварц Я.М., Соколенко Л.Г. 2004. Мониторинг электрического состояния приземного слоя атмосферы на территории России. - Труды НИЦ ДЗА, вып. 5(553), с. 169-175.
8. Будыко М.И. (отв. редактор перевода с английского языка), 1974. Непреднамеренные воздействия на климат.- Л.: Гидрометеиздат, с. 182-185.
9. ГОСТ Р 8.845-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения аэроионного состава воздуха. Метод измерений объемной плотности электрического заряда воздуха и счетной концентрации легких аэроионов на основе аспирационного конденсатора.
10. Таммет Х.Ф. Аспирационный метод измерения спектра аэроионов// Ученые записки Тартуского гос. Университета, вып. 195, Тарту, 1967, с. 109.
11. Колерский С.В., Журавлев А.В., Колерская С.С., Зубков П.Н. Передача единицы счетной концентрации легких аэроионов от эталона рабочим средствам измерений// Измерительная техника, 2013, №5, с. 47-48.