

ТАРТУСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Аэроэлектрическая лаборатория
РЫБОЛОВЕЦКИЙ КОЛХОЗ "ЛЯЭНЕ КАЛУР"

С Ч Е Т Ч И К И А Э Р О И О Н О В

Методическое руководство для использова-
ния счетчиков аэроионов, разработанных в
Тартуском государственном университете

Хаапсалу 1985

«СОСТАВИЛ Х. Ф. ТАММЕТ».

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3

1. ПРИРОДА АЭРОИОНОВ

1.1. Возникновение аэроионов 4

1.2. Эволюция и состав легких аэроионов 5

1.3. Подвижность аэроионов 7

1.4. Концентрация аэроионов 9

1.5. Уничтожение аэроионов 11

1.6. Распространение аэроионов 13

1.7. Применения аэроионов 15

2. АСПИРАЦИОННЫЙ МЕТОД

2.1. Измерительный конденсатор 17

2.2. Ток насыщения и омический ток 19

2.3. Предельная подвижность и условная концентрация 20

2.4. Схема включения измерительного конденсатора 22

2.5. Чувствительность счетчика 23

2.6. Пределы измерения 25

2.7. Репрезентативность измерений 26

2.8. Обработка наблюдений 28

3. СЧЕТЧИК АЭРОИОНОВ

3.1. Измерительный конденсатор 31

3.2. Воздушный тракт 33

3.3. Электрическая схема 34

3.4. Выбор режима измерения 36

3.5. Коррекция нуля 38

3.6. Диагностика и устранение отказов 39

ЛИТЕРАТУРА 42

ВВЕДЕНИЕ

Счетчик аэроионов - сложный научно-исследовательский прибор, который изготавливается единичными экземплярами. Владение методикой использования прибора ставит сложные проблемы. Для правильной постановки задач измерения необходимо разобраться в сотнях научных статей, написанных специалистами по физике, метеорологии, химии, физиологии и по другим дисциплинам. Техническая эксплуатация счетчика требует не только квалификации инженера-электроника, но и специальных знаний, навыков по электрометрическим измерениям.

В типичных условиях использования счетчика аэроионов с прибором заняты два человека. Один из них специалист по проблеме, для решения которой необходимо провести аэрионные измерения. Другой - инженер-электроник, который способен справиться с техническим обслуживанием прибора. Инженер-электроник найдет сведения, необходимые для выполнения своих задач, из прилагаемого к прибору технического описания и инструкции по эксплуатации. Этот документ составлен согласно соответствующему стандарту, отличается сжатостью изложения и точно описывает конкретный уникальный прибор. Техническое описание, однако, мало помогает при постановке задач измерения.

Настоящее руководство предназначено для облегчения работы исследователя при овладении методикой аэрионных измерений. Методическое руководство не заменяет технического описания счетчика, а также не освобождает исследователя от изучения научной литературы. Оно должно быть рассмотрено как введение, подготавливающее читателя к изучению специальной литературы, а также к практической работе с прибором.

1. ПРИРОДА АЭРОИОНОВ

1.1. Возникновение аэроионов

Воздух, который не содержит заряженных частиц, является абсолютным изолятором. Реальный воздух является изолятором среднего качества. Удельное сопротивление природного воздуха 10^{14} Ом·м, что на 2-3 порядка ниже удельного сопротивления наилучших изоляционных материалов. Электропроводность воздуха обусловлена наличием в нем заряженных частиц, которые называются аэроионами. Аэроионом называется любая заряженная частица, взвешенная в воздухе, если его средняя скорость относительно воздуха в подавляющей мере определяется электрическими силами. Наименьшие аэроионы состоят из нескольких молекул, наибольшие - примерно из 10^7 молекул. Роль свободных электронов в электропроводности воздуха не превышает 0,01% и может не учитываться.

Если удалось бы исключить все специальные ионизирующие факторы, то аэроионы образовывались бы за счет флуктуации теплового движения молекул. В таком случае появления первого акта ионизации молекул кислорода во всей атмосфере земли пришлось бы ждать примерно 10^{150} лет. Все реально существующие аэроионы образованы за счет действия специальных ионизирующих факторов.

В природе аэроионы образуются в результате действия ионизирующих излучений. Возникновение, эволюция и роль аэроионов в природе описаны в книге [1].

Для искусственного создания аэроионов используются четыре механизма:

- 1) коронный разряд,
- 2) контактная зарядка аэрозольных частиц,
- 3) радиоактивное или рентгеновское излучение,
- 4) термоионная эмиссия с нагретых поверхностей.

В природе космическое излучение создает в каждом кубическом сантиметре по две пары аэроионов в секунду. Это записывается как интенсивность ионообразования 2J. Природный воздух над материками содержит радиоактивные эманации, постоянно выделяющиеся из почвы. Эти эманации дают радиоактивное излучение с интенсивностью около 10^{-5} ... $2 \cdot 10^{-5}$ рентген в час, что соответствует интенсивности ионообразования около 8J. Таким образом над матери-

ками основная причина ионообразования - естественная радиоактивность. Высказанное относится также к закрытым помещениям, где добавляется еще радиоактивное излучение стен, и интенсивность ионообразования может дойти до 50J.

Эффективность прибора для искусственного создания аэроионов - аэроионизатора - обычно не ограничивается ресурсами ионообразования, которые могут быть очень большими. Например, ток коронного разряда 1 мА создает $6 \cdot 10^{15}$ ионов/с. Если бы удалось однородно распространить эти аэроионы в помещении с объемом 1000 м^2 , то мы получили бы фантастический уровень ионообразования - $6 \cdot 10^6$ ионов/(см³·с). Реальная эффективность аэроионизатора ограничивается интенсивностью распространения аэроионов в помещении.

В результате первоначального акта ионизации возникают свободный электрон и мономолекулярный положительный ион. Свободный электрон практически мгновенно прилипает к ближайшей встречной молекуле кислорода. В воздухе остаются два аэроиона - положительный и отрицательный, которые начинают сложный путь эволюции через цепь ионно-молекулярных реакций, которые особенно интенсивно протекают в первые сотые доли секунды жизни аэроионов.

1.2. Эволюция и состав легких аэроионов

Легкий аэрион сталкивается с нейтральными молекулами примерно каждые 10^{-10} с. При естественном уровне ионизации легкий аэрион живет около одной минуты, причем примерно 5% легких аэрионов заканчивает свою жизнь рекомбинацией с легким аэрионом противоположной полярности, а 95% легких аэрионов погибает при встрече с нейтральными или противоположно заряженными аэрозольными частицами, которые состоят из многих тысяч молекул. За свою жизнь легкий аэрион успеет проделать около 10^{12} столкновений с нейтральными молекулами.

При каждом столкновении аэриона с нейтральной молекулой может произойти химическая реакция. Заряженные молекулы обладают химическими свойствами, отличающимися от химических свойств нейтральных молекул. Они гораздо активнее и могут образовывать соединения, непривычные в химии нейтральных молекул. Химические реакции с участием ионов называются ионно-молекулярными реакциями и они подробно изучены за последние 10-15 лет.

Несмотря на существование обширных сведений об ионно-молекулярных реакциях, невозможно сказать, что конкретно происходит с аэроионом в реальном воздухе. Для того, чтобы это выяснить, мы должны, в первую очередь, узнать состав воздуха, учитывая все составляющие, с которыми аэрион может быть встретится в серии из 10^{12} столкновений. То есть мы должны определить все примеси воздуха, удельная концентрация которых не ниже $10^{-10}\%$. В настоящее время это невозможно. На таком уровне воздух содержит всевозможные экзотические вещества, причем конкретный состав варьируется в пространстве и во времени. О эволюции и составе легких аэрионов можно высказать лишь некоторые общие соображения.

В течение своей жизни легкий аэрион претерпевает огромное количество химических превращений. Чем старше аэрион, тем более редкие примеси будут определять его состав. Основу аэриона составляет молекула какого-то активного вещества. В случае отрицательных аэрионов активность веществ зависит от сродства к электрону. Наивысшие сродства к электрону характерны для циана, галогенов и их соединений. Активно участвуют в химии отрицательных аэрионов также окислы азота и серы. Активность веществ в реакциях с положительными аэрионами коррелирована потенциалом ионизации. Основой положительного аэриона могут быть, в частности, аммиак и сернистый водород. Наиболее активные вещества относительно реакции с положительными аэрионами - щелочные металлы.

Конкретный химический состав аэрионов зависит от того, какие активные вещества в воздухе преобладают. Например, экспериментально установлено, что при добавлении к обычному атмосферному воздуху $10^{-5}\%$ какого-то галогена, например, йода, почти все отрицательные аэрионы будут содержать молекулу этого галогена.

Кроме молекулы активного вещества, которая составляет основу аэриона, легкий аэрион содержит еще несколько добавочных молекул, прилипнувших к основной молекуле и придерживаемых как электрическими, так и молекулярными силами. Число таких молекул может меняться от столкновения к столкновению и обычно ниже десяти. Если воздух не содержит каких-то специальных примесей, то

к основной молекуле прилипают молекулы воды. В химии такое образование называется кластером молекул. Говорят, что легкие аэрионы в воздухе - кластерные ионы, что отличает их от ионов, обычно изучаемых в физике плазмы и газового разряда.

Подробные сведения о физике и химии кластерных ионов можно найти в книге [2].

1.3. Подвижность аэрионов

При описании аэрионного режима представляют интерес с одной стороны свойства самих аэрионов, а с другой стороны - количество аэрионов в воздухе.

Химический состав аэрионов можно изучить только в условиях сложнейшего лабораторного эксперимента. При решении этой задачи возможности наиболее совершенной современной аппаратуры сильно ограничены и достоверность интерпретации результатов измерения не высокая.

Единственной относительно просто измеряемой характеристикой аэриона является ее электрическая подвижность. Подвижность k определяется как отношение средней скорости дрейфа аэриона в электрическом поле к напряженности этого поля:

$$k = v/E . \quad (1)$$

Единица подвижности в СИ - $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. В практике распространена также традиционная внесистемная единица измерения $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. $1 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с}) = 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Подвижности аэрионов варьируются от $0,0001 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ до $2 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Аэрионы с подвижностями ниже $0,0001 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ существуют в ничтожно малых количествах. Максимальные подвижности, уверенно обнаруженные при изучении природного воздуха, около $2,2 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Распределение аэрионов по подвижностям называется спектром аэрионов. В спектре подвижностей отчетливо выделяются две группы:

- легкие аэрионы с подвижностями $0,5 \dots 2 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$
 - тяжелые аэрионы с подвижностями $0,0001 \dots 0,01 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.
- Подавляющее большинство легких аэрионов в природном воздухе имеют подвижность $1 \dots 2 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, а подавляющее большинство тяжелых аэрионов - $0,0001 \dots 0,001 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Аэрионы с под-

вижностями $0,01 \dots 0,5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ называются промежуточными и они наблюдаются только в исключительных особых условиях.

Спектр легких аэроионов является дискретным и в нем доминируют обычно 2...4 линий. Разрешение этих линий является трудной экспериментальной задачей, которая не может быть решена с помощью обычного счетчика аэроионов. Конкретный спектр зависит от конкретного букета микропримесей воздуха. Типичные для природного воздуха средние подвижности $k_- \approx 1,6 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и $k_+ \approx 1,3 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Заряд легкого аэроиона всегда равен одному элементарному заряду. Тяжелые аэроионы - заряженные аэрозольные частицы. Они образуются обычно при столкновении легкого аэроиона с нейтральной аэрозольной частицей, могут образовываться в исключительных условиях также в результате конденсации вещества на легком аэроионе. В природных условиях тяжелый аэроион несет обычно один, редко два элементарных заряда. В случае искусственной аэроионизации аэрозольные частицы могут получить десятки и сотни элементарных зарядов. При этом подвижность аэроиона будет соответственно выше. В редких особых случаях подвижность заряженных аэрозольных частиц достигает подвижности легких аэроионов. При этом измерительная аппаратура воспринимает эти частицы как легкие аэроионы, хотя и сами частицы имеют совсем другую природу. Поэтому результаты изучения принудительно заряженных аэрозольных частиц следует интерпретировать особенно осторожно. Доступным введением в соответствующие специальные проблемы является книга [3]. В качестве авторитетного руководства к общим проблемам аэрозолей можно рекомендовать книгу [4].

Подвижность однократно заряженных сферических частиц зависит от диаметра частиц следующим образом:

d	10	15	20	30	50	75	100	200	нм
k	214	97	55	25	10	5	3	1	$10^{-4} \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$

Частицы размеров больших, чем указано в таблице, имеют в природном воздухе очень низкую концентрацию, а частицы меньших размеров не приобретают электрического заряда. Исключением является процесс конденсации вещества на легких аэроионах, что может привести к образованию весьма нестабильных промежуточных аэроионов.

1.4. Концентрация аэроионов

Полная численная концентрация аэроионов определяется как среднее число аэроионов в единице объема. Вопреки кажущейся универсальности, это понятие в практике не используется, поскольку аэроионы с разными подвижностями играют в применениях существенно разную роль и не могут быть описаны совместно.

Определенная фракция или класс аэроионов описывается с помощью частной концентрации аэроионов, в которой учитываются только те аэроионы, подвижности которых входят в заданный интервал подвижностей. Технические затруднения при измерении заставляют нас ограничиваться рассмотрением широких интервалов подвижностей с нечетко определенными границами. Обычно удовлетворяются разделением полного диапазона подвижности только на два класса, соответствующие легким и тяжелым аэроионам.

Тяжелый аэроион может нести два-три элементарных заряда. Все известные измерительные приборы реагируют на заряд и регистрируют двукратно заряженный аэроион как два аэроиона. Если мы не желаем допустить систематическую ошибку измерения, то приходится отказаться от намерения измерить истинную численную концентрацию тяжелых аэроионов. Измерить можно только некоторую эффективную концентрацию, в которой двукратно заряженный аэроион и учитывается как два аэроиона. В области легких аэроионов эффективная концентрация равна истинной численной концентрации, в области природных тяжелых аэроионов эффективная концентрация немного выше, а в области искусственно заряженных аэрозольных частиц может быть существенно выше истинной численной концентрации аэроионов.

В практике термин "эффективная концентрация аэроионов" не используется. Ради краткости слово "эффективная" опускается, хотя по существу речь идет об эффективной концентрации. Так будем поступать и мы.

Параллельно понятию численной концентрации используется понятие концентрации заряда аэроионов. Эта величина показывает суммарный заряд в единице объема воздуха, носимый аэроионами определенного класса. Если выразить плотность заряда аэроионов в элементарных зарядах на единицу объема, то ее численное значение совпадает с численным значением эффективной концентрации аэроионов.

нов. Преимущество понятия концентрации заряда аэроионов в том, что здесь автоматически исключены недоразумения, связанные с кратным зарядом тяжелых аэроионов. В строгой физической литературе концентрация заряда называется частной плотностью заряда, носимой аэроионами определенного класса.

Официальная единица измерения концентрации заряда аэроионов по СИ - Кл/м³. Это очень большая единица, в практике удобно использовать единицу 1 пКл/м³ = 10⁻¹² Кл/м³. Традиционная внесистемная единица измерения концентрации заряда аэроионов - эл.зар./см³:

$$1 \text{ эл.зар./см}^3 = 0,16 \text{ пКл/м}^3.$$

Типичные для природного воздуха значения концентрации заряда легких аэроионов 500 эл.зар./см³ = 80 пКл/м³ и тяжелых аэроионов 5000 эл.зар./см³ = 800 пКл/м³. Концентрация аэроионов зависит от интенсивности ионообразования и от концентрации аэрозольных частиц в воздухе.

При увеличении интенсивности ионообразования растет концентрация легких аэроионов. В случае биполярной ионизации (создаются аэроионы обеих полярностей) концентрация тяжелых аэроионов не меняется, а в случае униполярной ионизации (создаются аэроионы одной полярности, например, с помощью коронного разряда) растет также концентрация тяжелых аэроионов соответствующей полярности. Очень сильная униполярная ионизация приводит к осаждению аэрозольных частиц (эффект электрофильтра), что тормозит рост концентрации тяжелых аэроионов.

При увеличении концентрации аэрозольных частиц концентрация легких аэроионов убывает и концентрация тяжелых аэроионов растет пропорционально концентрации аэрозольных частиц. При этом основную роль играют невидимые аэрозольные частицы размером около 0,1 мкм, которые не действуют на прозрачность воздуха.

Нерадиоактивные газообразные примеси воздуха не действуют на концентрацию аэроионов. Они могут лишь немного изменить подвижность легких аэроионов.

Традиционные обозначения для концентрации легких аэроионов обеих полярностей n_+ и n_- , а для концентраций тяжелых аэроионов N_+ и N_- . Соответствующие концентрации заряда аэроионов можно обозначить $e n_+$, $e n_-$, $e N_+$ и $e N_-$, где e обозначает элементарный

заряд. Перевес легких аэроионов одной или другой полярности описывается с помощью указателя полярности легких аэроионов $(n_+ - n_-)/(n_+ + n_-)$. Указатель полярности равен -1 для униполярно отрицательной аэроионизации, 0 для симметрично-биполярной аэроионизации и +1 для униполярно положительной аэроионизации. Для природного воздуха типичны значения 0...0,2.

Концентрация легких аэроионов тесно связана с электропроводностью воздуха, которая является основной характеристикой аэрионного состояния воздуха в метеорологии. Если не учитывать поправку на тяжелые аэроионы, которая обычно ниже одного процента, то полярные электропроводности будут

$$\lambda_{\pm} = k_{\pm} e n_{\pm}, \quad (2)$$

где k_{\pm} - средняя подвижность положительных или отрицательных легких аэроионов. Электропроводность измеряется в фемтосименсах на метр. В случае типичных значений подвижностей

$$\left. \begin{aligned} \lambda_+ &\approx \frac{n_+ : \text{см}^{-3}}{50} \text{ фСм/м} \\ \lambda_- &\approx \frac{n_- : \text{см}^{-3}}{40} \text{ фСм/м.} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Суммарная электропроводность воздуха $\lambda = \lambda_+ + \lambda_-$.

1.5. Уничтожение аэроионов

Аэроионы уничтожаются или путем рекомбинации с аэроионами противоположной полярности или путем осаждения на стенки помещения. Кроме того легкий аэроион может превращаться в тяжелый при его столкновении с нейтральной аэрозольной частицей. Сточки зрения баланса легких аэроионов это равносильно уничтожению легкого аэроиона. В редком случае легкий аэроион может прилипнуть даже к тяжелому аэроиону той же полярности, повышая кратность его заряда.

Роль разных факторов уничтожения аэроионов зависит от их подвижности (легкие или тяжелые аэроионы), концентрации, указателя полярности, концентрации аэрозольных частиц. Рассмотрим ниже типовые условия.

1. Природные условия. Концентрации аэроионов разных полярностей почти равны, количество легких положительных аэроионов обычно превышает количество легких отрицательных аэроионов на несколько десятков процентов. Легкие аэроионы уничтожаются пре-

имущественно путем прилипания к аэрозольным частицам - или нейтральным, или противоположно заряженным. Только несколько процентов легких аэроионов уничтожаются путем взаимной рекомбинации. Тяжелые аэроионы уничтожаются преимущественно путем рекомбинации с противоположно заряженными легкими аэроионами.

2. Искусственная биполярная аэроионизация. Создаются легкие аэроионы обеих полярностей. В случае слабой аэроионизации (концентрация ниже 20000 см^{-3}) доминируют те же механизмы, что и в природных условиях. В случае сильной аэроионизации будет доминировать взаимная рекомбинация легких аэроионов.

3. Искусственная униполярная аэроионизация. Создаются легкие аэроионы одной полярности. Рекомбинации не происходит, поскольку нет достаточного количества аэроионов противоположной полярности. Аэроионы уничтожаются путем интенсивного осаждения на стенки помещения. Этот процесс называется электростатическим рассеиванием и управляется электростатическим полем, которое создают сами аэроионы. Чем больше помещение, тем больше в нем объемный заряд и сильнее электростатическое поле. При этом скорость уничтожения аэроионов в расчете на единицу объема не зависит от размеров помещения и определяется только концентрацией аэроионов.

Если создать в чистом воздухе много легких аэроионов обеих полярностей и затем прекратить ионообразование, то рекомбинация уменьшает концентрацию аэроионов любой полярности по закону

$$n = \frac{650000 \text{ см}^{-3}}{t:c}, \quad (4)$$

где $t:c$ обозначает численное значение времени в секундах. Начало отсчета времени (момент запуска секундомера) должно быть выбрано так, чтобы формула (4) дала бы в момент прекращения ионообразования правильную начальную концентрацию аэроионов.

Если в таком же эксперименте первоначально создаются аэроионы только одной полярности, то электростатическое рассеивание уменьшает концентрацию аэроионов по аналогичному закону

$$n = \frac{350000 \text{ см}^{-3}}{t:c}. \quad (5)$$

Сравнение формул (4) и (5) показывает, что биполярная и униполярная аэроионизации обладают стабильностью одинакового порядка. Уравнение равновесия концентрации легких аэроионов в условиях

стабильной симметрично-биполярной ионизации записывается следующим образом

$$q = \alpha n^2 + \beta n, \quad (6)$$

где q - интенсивность ионообразования, $\alpha \approx 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$ - коэффициент рекомбинации легких аэроионов и β - электрическая плотность аэрозоля. В природном воздухе $\beta = 0,01 - 0,1 \text{ с}^{-1}$, $\alpha n^2 \ll \beta n$ и $n \approx q/\beta$. Электрическая плотность аэрозоля определяется в основном частицами с размером около $0,1 \text{ мкм}$, которые не понижают прозрачность воздуха. Понятие электрической плотности аэрозоля подробнее рассмотрено в работе [5].

1.6. Распространение аэроионов

Природный процесс ионообразования относительно однороден в пространстве и проблема распространения аэроионов второстепенна. В случае искусственной аэроионизации источник аэроионов локальный. Например, в коронном аэроионизаторе аэроионы создаются только вблизи поверхности острия или тонкой проволоки. Эффективность аэроионизатора определяется эффективностью распространения аэроионов в пространстве.

Аэроионы переносятся потоком воздуха и движутся под действием электрического поля. Роль диффузии в распространении аэроионов небольшая - наиболее легко диффундирующие аэроионы могут передвигаться за счет диффузии в среднем всего на 30 см за 100 секунд.

При распространении аэроионов одновременно происходит их уничтожение путем рекомбинации или электростатического рассеивания. В окрестности аэроионизатора соблюдаются формулы (4) и (5). Высокая концентрация обеспечивается только при условии быстрого распространения аэроионов. Если аэроионы дойдут от аэроионизатора до рассматриваемой точки за 10 с , то их концентрация не может быть выше 65000 см^{-3} .

Биполярную аэроионизацию можно распространить только путем переноса с движением воздуха. Ламинарный поток воздуха не обладает расходимостью и аэроионы распространяются узкой струей. В турбулентном потоке аэроионы расходятся, но это сопровождается разбавлением ионизованного воздуха с воздухом помещения, что

приводит к существенному ускорению процесса убывания концентрации аэроионов по сравнению с вычисленной по формуле (4). Распространение в помещении искусственной биполярной аэроионизации, созданной локальным источником, оказывается малоэффективным.

Униполярные аэроионы не рекомбинируют. Электростатическое поле объемного заряда аэроионов является расходящимся и поэтому униполярные аэроионы сами расходятся при распространении под действием электрического поля. Наиболее выгодные условия распространения аэроионов обеспечит аэроионизатор с коронирующей антенной из сверхтонкой проволоки. При этом возникает электрическое поле, в котором аэроион удаляется от проволоки с постоянной скоростью. На основе формулы (5) получим оценку концентрации аэроионов

$$n \approx 55 \frac{(U - U_0):B}{(x:m)(h:m)} \text{ см}^{-3}, \quad (7)$$

где $(U-U_0):B$ - разность действительного напряжения проволоки и напряжения зажигания коронного разряда в вольтах, $(x:m)$ - расстояние рассматриваемой точки от антенны в метрах и $(h:m)$ - расстояние стены или пола от антенны в метрах. Например, если $U_0 = 5 \text{ кВ}$, $U = 15 \text{ кВ}$, $h = 3 \text{ м}$, то на расстоянии $1,5 \text{ м}$ от проволоки $n \approx 120000 \text{ см}^{-3}$. Формула (7) достаточно точна для таких расстояний, где $n > 100000 \text{ см}^{-3}$ и постепенно теряет точность при понижении концентрации аэроионов. Это обусловлено действием аэрозоль, не учтенных при выводе формулы.

Аэрозольные частицы поглощают легкие аэроионы. В силу закона сохранения заряда частица не может беспредельно поглощать униполярный заряд. В течение нескольких минут она заряжается до своего предела и в дальнейшем теряет способность поглощать легкие аэроионы той же полярности. При этом аэрозольные частицы проявляют себя только как носители дополнительного объемного заряда, который ускоряет рассеивание легких аэроионов по сравнению с формулой (7).

Заряженные при униполярной аэроионизации аэрозольные частицы сами будут рассеиваться в поле объемного заряда и если их запас не имеет мощного дополнения, то концентрация аэрозольных частиц будет постепенно уменьшаться (эффект электрофильтра). При этом частицы осаждаются на стенках помещения. Необходимо

учитывать, что одновременно растет эффективность осаждения частиц в легких человека, хотя и в существенно меньшей степени по сравнению с ростом эффективности осаждения на стенках помещения.

1.7. Применения аэроионов

Аэроионы являются составляющей природного воздуха и играют определенную роль в атмосферных процессах. Поэтому аэроионы изучаются в физике атмосферы. Интерес к атмосферным аэроионам возрос в связи с глобальным загрязнением атмосферы инертным радиоактивным газом криптоном-85, который выделяется атомными электростанциями. По причине инертности радиоактивность криптона-85 не представляет прямой опасности для биосферы и его действие проявляется только через аэроионы. Через несколько десятилетий возможно заметное увеличение интенсивности природного ионообразования, что может воздействовать на распределение осадков.

Аэроионы и методы аэрозольных измерений находят применение в медицине, гигиене и ветеринарии, а также в некоторых технологических процессах.

Интерес к аэроионам в медицине, гигиене и ветеринарии имеет две причины. Одна причина в том, что аэроионы оказываются наиболее чувствительным физическим индикатором загрязненности воздуха. Другой причиной является проблема непосредственного воздействия аэроионов на живые организмы.

Эффективность аэроионных измерений как метода оценки чистоты воздуха бесспорна. Появление в воздухе аэрозольных загрязнений, в том числе необнаруживаемых с помощью оптических методов, приводит к уменьшению концентрации легких аэроионов и к увеличению концентрации тяжелых аэроионов. Появление в воздухе радиоактивных загрязнений приводит к увеличению концентрации легких аэроионов, но не воздействует на концентрацию тяжелых аэроионов. Загрязнение воздуха следами ядовитых газов вызывает сдвиги в спектре подвижностей легких аэроионов.

Обзор исследований по воздействию аэроионов на живые организмы можно найти в книгах [6,7]. Несмотря на большую проделанную исследовательскую работу, осталось еще много нерешенных проблем. Поэтому медицинское применение аэроионов является привилегией высококвалифицированных специалистов. Широкое применение

ние методов аэроионотерапии пока не рекомендуется.

В 1980 г. Министерство здравоохранения СССР утвердило санитарно-гигиенические нормы допустимых уровней ионизации воздуха производственных и общественных помещений [8]. Эти нормы распространяются на все производственные и общественные здания, имеющие помещения, оборудованные кондиционерами воздуха. Нормы регламентируют количество только легких аэроионов. Нормативные величины следующие:

Уровни	Число легких аэроионов в 1 см ³	
	+ воздуха	-
Минимально необходимый	400	600
Оптимальный	1500-3000	3000-5000
Максимально допустимый	50000	50000

Измерение числа аэроионов и их полярности в порядке надзора должно выполняться ежеквартально. Для измерения концентрации аэроионов рекомендуются счетчик аэроионов Тартуского государственного университета или счетчик аэроионов АСИ-1.

2. АСПИРАЦИОННЫЙ МЕТОД

2.1. Измерительный конденсатор

Основным методом аэроионных измерений является аспирационный метод, другими словами, метод протягивания воздуха. Аспирационный прибор для измерения аэроионов называется аспирационным счетчиком аэроионов. Это название условное - аспирационный счетчик способен реагировать только на большое количество аэроионов (не менее 1000) и не может вести прямой счет аэроионов.

Основным узлом аспирационного счетчика является аспирационный измерительный конденсатор. Известны измерительные конденсаторы с плоской геометрией и измерительные конденсаторы с осесимметричной геометрией. Осесимметрические измерительные конденсаторы используются чаще.

Принципиальное устройство осесимметричного измерительного конденсатора изображено на рис. 1.

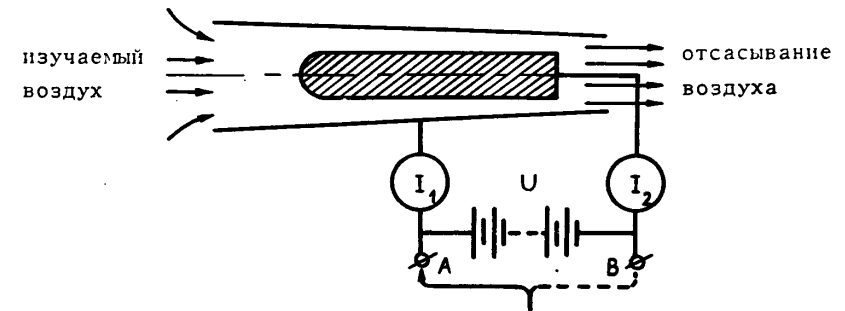


Рис. 1. Разрез и общая схема включения интегрального измерительного конденсатора.

Измерительный конденсатор состоит из внешней обкладки и внутренней обкладки. В специальных измерительных приборах обкладки могут быть разделены на изолированные друг от друга кольца или измерительный конденсатор может иметь насадку для ввода воздуха по слоям. Такие измерительные конденсаторы называются дифференциальными и в настоящей работе они не рассматриваются.

Электрическая емкость между обкладками измерительного конденсатора, не включающая емкости электрометра и соединительного

провода, называется действующей емкостью измерительного конденсатора и обозначается C . Расход (объемная скорость) воздуха, протягиваемого между обкладками, обозначается Φ . Электрическое напряжение между обкладками обозначается U . Обычно $C = 10 \dots 200$ пФ, $\Phi = 100 \dots 10000$ см³/с и $U = 10 \dots 1000$ В в зависимости от назначения измерительного конденсатора.

Если измерительный конденсатор должен обеспечить измерение детального распределения аэроионов по подвижности, то поток воздуха внутри конденсатора должен быть ламинарным. Обеспечение ламинарности потока воздуха - сложная техническая задача, при этом необходимо погасить турбулентные пульсации во входящем воздухе и ограничить расход воздуха. В обычных счетчиках с интегральным измерительным конденсатором небольшая турбулентность допустима.

Электрическое поле между обкладками измерительного конденсатора заставляет аэроионы дрейфовать поперечно воздушному потоку, причем они могут дойти до обкладки и отдать свой заряд. Измерив силу тока через обкладку, можно судить о количестве осажденных аэроионов, точнее, о количестве осажденных элементарных зарядов. Поскольку отрицательные аэроионы осаждаются на одну, а положительные на другую обкладку, то один измерительный конденсатор позволяет одновременно измерить аэроионы обеих полярностей. Однако техническая реализация схемы, изображенной на рис. 1, встречает определенные затруднения. Поэтому в практике, как правило, измеряется ток аэроионов только с одной обкладки, а другая обкладка подключается прямо к источнику напряжения - один из индикаторов тока (электрометров) на рис. 1 заменяется просто на провод.

Сила тока через внутреннюю обкладку I_2 может существенно отличаться от силы тока через внешнюю обкладку I_1 . Иногда это толкуется, как парадокс с точки зрения электротехники. Решение парадокса следующее. К измерительному конденсатору подключены не только те два токопровода, которые обычным способом указаны на рис. 1, а также неметаллические токопровода через входящий и выходящий воздух. Если средние плотности заряда в воздухе на входе и выходе ρ_1 и ρ_2 , то дисбаланс электрических токов через воздух равен $(\rho_1 - \rho_2)\Phi$. Это точно покрывает дисбаланс токов через провода $I_1 - I_2$.

2.2. Ток насыщения и омический ток

Для простоты рассмотрим вначале только легкие аэроионы и допустим, что все они имеют одинаковую подвижность k .

В случае достаточно высокого напряжения между обкладками измерительного конденсатора все аэроионы осаждаются на обкладках. Сила тока через положительную обкладку будет тогда $I_- = n_- e\Phi$ и сила тока через отрицательную обкладку $I_+ = n_+ e\Phi$. При дальнейшем повышении напряжения сила тока не растет, закон Ома не действует. Это называется режимом насыщения. Измерив силу тока насыщения, можно вычислить концентрацию аэроионов n_{\pm} . Для этого достаточно уметь правильно измерить силу электрического тока I и расход воздуха Φ . Непосредственная калибровка прибора по эталонному источнику аэроионов или эталонному счетчику не нужна - аспирационный метод является абсолютным методом измерения.

Если напряжение между обкладками низкое и не все аэроионы осаждаются в измерительном конденсаторе, то процент осаждения аэроионов пропорционален напряжению. Соблюдается закон Ома $I_{\pm} = \frac{C}{\epsilon_0} \lambda_{\pm} U$, где λ_{\pm} - полярная проводимость или электропроводность воздуха и ϵ_0 - электрическая постоянная. Это режим омического тока, который используется для измерения электропроводности воздуха. При измерении электропроводности воздуха отпадает необходимость точного определения расхода воздуха, который не входит в расчетную формулу.

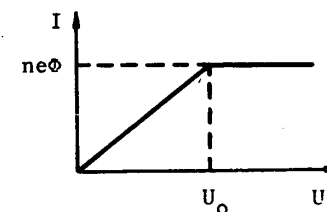


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика интегрального измерительного конденсатора в случае моно-подвижных аэроионов.

Зависимость тока аэроионов от напряжения измерительного конденсатора в рассмотренных условиях показана на рис. 2. При $U < U_0$ наблюдается режим омического тока, а при $U > U_0$ - режим насыщения. Переходное напряжение U_0 зависит от подвижности аэроионов.

Если воздух содержит аэроионы с разными подвижностями, то вольт-амперная характеристика измерительного конденсатора выглядит иначе. Вольт-амперную характеристику можно тогда построить как сумму частных вольт-амперных характеристик, соответствующих разным подвижностям. Обозначим переходное напряжение для наиболее подвижных аэроионов через U_1 , а переходное напряжение для наименее подвижных аэроионов U_2 . Результат показан на рис. 3.

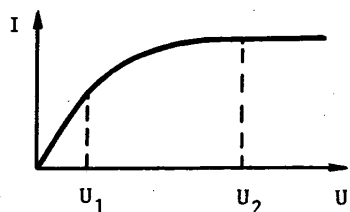


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика интегрального измерительного конденсатора в случае непрерывного распределения аэроионов по подвижностям.

В области $0 < U < U_1$ наблюдается омический ток и по результатам измерения можно вычислить проводимость воздуха. В области $U_2 < U$ наблюдается ток насыщения и по результатам измерения можно вычислить концентрацию аэроионов. Область $U_1 < U < U_2$ является переходной и здесь наблюдается сложная связь между спектром аэроионов и кривой $I = I(U)$.

Подробная теория вольт-амперной характеристики измерительного конденсатора изложена в книге [9].

2.3. Предельная подвижность и условная концентрация

Напряжение перехода омического тока аэроионов одной и той же подвижности в ток насыщения можно вычислить по условию равенства омического тока и тока насыщения $\frac{C}{\epsilon_0} \lambda U_0 = ne\phi$. Поскольку $\lambda = kne$, получим $U_0 = \epsilon_0 \phi / (Ck)$.

В реальных условиях существуют аэроионы с разными подвижностями. Напряжение измерительного конденсатора имеет единственное значение. Можно вычислить подвижность, для которой наблюдается переход от омического тока к току насыщения

$$k_0 = \frac{\epsilon_0 \phi}{CU} \quad (8)$$

Практическая формула

$$k_0 = 0,0886 \frac{\phi: \text{см}^3/\text{с}}{(C:\text{пф})(U:\text{В})} \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \quad (9)$$

Подвижность k_0 называется предельной подвижностью измерительного конденсатора. Необходимо знать, что предельная подвижность характеризует не аэроионы, а измерительный конденсатор, точнее, режим измерительного конденсатора. Аэроионы с такой подвижностью могут вообще не существовать.

Предельная подвижность конкретного измерительного конденсатора может варьироваться путем варьирования расхода воздуха и напряжения между обкладками. Во многих счетчиках аэроионов такая возможность предусмотрена.

Если в измерительный конденсатор попадают аэроионы с разными подвижностями, то те аэроионы, подвижность которых меньше предельной подвижности, осаждаются в пропорции k/k_0 и образуют омическую составляющую тока в измерительном конденсаторе. Те аэроионы, подвижность которых больше предельной подвижности, осаждаются в полной мере и образуют насыщенную составляющую тока в измерительном конденсаторе.

Если подвижность всех аэроионов выше предельной подвижности измерительного конденсатора, то расчет концентрации заряда аэроионов по формуле $ne = I/\phi$ дает правильный результат. Эта же расчетная формула используется также в случаях, когда не все аэроионы имеют подвижность выше предельной. Тогда результат не может быть назван концентрацией заряда аэроионов. В общем случае результат описанного расчета называется условной концентрацией заряда аэроионов или, на более строгом языке, условной плотностью заряда аэроионов. Для условной концентрации заряда аэроионов принято обозначение P (большое греческое ρ).

Практическая расчетная формула следующая:

$$P = 624000 \frac{I:\text{пА}}{\phi:\text{см}^3/\text{с}} \text{ эл.зар./см}^3 \quad (10)$$

Условная концентрация заряда аэроионов зависит как от состояния воздуха, так и от предельной подвижности. При понижении предельной подвижности она растет и приближается к истинной концентрации заряда аэроионов.

В образовании условной концентрации заряда аэроионов те аэроионы, подвижность которых выше k_0 , участвуют в полной мере, а те аэроионы, подвижность которых ниже k_0 , в пропорции k/k_0 . Рассмотрим примеры. Если подвижность всех аэроионов выше k_0 , то P тогда равно концентрации заряда аэроионов. Если подвижность всех аэроионов составляет половину предельной подвижности, то и P составляет половину истинной концентрации заряда аэроионов. Если половина аэроионов имеют подвижность выше предельной, а оставшая половина - дважды ниже предельной, то условная концентрация составляет 3/4 истинной концентрации заряда аэроионов.

2.4. Схема включения измерительного конденсатора

Общая схема включения измерительного конденсатора, которая изображена на рис. 1, требует конкретизации. Выше сказано, что в практике используется только один измеритель тока аэроионов I_1 или I_2 . Конкретизировать надо также точку заземления А или В.

Обкладка измерительного конденсатора, которая соединена с измерителем тока аэроионов (электрометром), называется собирающей обкладкой, поскольку она собирает измерительные аэроионы. Другая обкладка отталкивает измеряемые аэроионы и называется отталкивающей обкладкой.

Существует четыре способа конкретизации схемы 1. Они перечислены ниже в таблице:

Измеряется	Заземлено	Название: счетчик с ...
I_1	А	... внешней собирающей обкладкой на низком потенциале
I_1	В	... внешней собирающей обкладкой на высоком потенциале
I_2	А	... внутренней собирающей обкладкой на высоком потенциале
I_2	В	... внутренней собирающей обкладкой на низком потенциале

В практике использовались три способа из четырех возможных. Вариант счетчика с внешней собирающей обкладкой на высоком потенциале остался нереализованным.

Счетчик с собирающей обкладкой на высоком потенциале имеет пониженную эксплуатационную надежность, поскольку нулевая клемма электрометра находится на относительно высоком потенциале и утечка с корпуса электрометра может привести к отказу счетчика. В схеме с собирающей обкладкой на низком потенциале нулевая клемма электрометра заземлена, что существенно упрощает устройство счетчика. Зато в счетчике с собирающей обкладкой на низком потенциале возможен внутренний краевой эффект, который может внести существенные искажения в результаты измерения при низких предельных подвижностях. В счетчиках с внутренней собирающей обкладкой на низком потенциале внутренний краевой эффект может быть подавлен только с помощью специальной защитной конструкции, которая усложняет устройство счетчика и понижает его эксплуатационную надежность. В счетчиках с внешней собирающей обкладкой на низком потенциале краевой эффект подавляется удлинением входной части внешней обкладки и использованием входной сетки. Эти меры не понижают эксплуатационную надежность счетчика. Если эксплуатационная надежность признается ведущим параметром качества счетчика, то следует предпочитать схему с внешней собирающей обкладкой на низком потенциале.

2.5. Чувствительность счетчика

Чувствительность счетчика ограничивается порогом измерения сверхслабого электрического тока. Сила тока аэроионов весьма мала. Если $n = 100 \text{ см}^{-3}$ и $\Phi = 1 \text{ литр/с}$, то $I = ne\Phi = 1,6 \cdot 10^{-14} \text{ А}$. Современная электроника предоставляет нам неограниченные возможности для усиления силы тока. Порог чувствительности определяется уровнем паразитных токов, которые налагаются на измерительный ток аэроионов. Паразитные токи изменчивы во времени и поэтому ошибка измерения тока аэроионов приблизительно равна уровню паразитных токов. Если максимальная допустимая ошибка измерения концентрации аэроионов 10%, то порог чувствительности счетчика по концентрации аэроионов

$$n_0 = \frac{10\Delta I}{e\Phi}, \quad (11)$$

где ΔI - уровень паразитного тока.

Существенны три источника паразитного тока. Паразитный ток первого рода обусловлен нестабильностью источника напряжения измерительного конденсатора. Если $C = 100$ пФ, $U = 100$ В и это напряжение дрейфует в среднем 0,01% за 100 с, то на собирающую обкладку индуцируется паразитный ток в 10^{-14} А. В случае $\Phi = 1$ литр/с это ограничивает порог чувствительности значением $n_0 = 625$ см⁻³. Рассмотренная в примере стабильность напряжения оказывается не вполне удовлетворительной. В случае измерения легких аэроионов можно увеличить расход воздуха, уменьшить действующую емкость и напряжение измерительного конденсатора. При этом паразитный ток первого рода существенно уменьшается. В случае измерения тяжелых аэроионов необходимы более высокое напряжение измерительного конденсатора и более низкий расход воздуха по сравнению с примером. При этом паразитный ток первого рода будет основным фактором, ограничивающим чувствительность счетчика. Для обеспечения порога чувствительности $n_0 = 1000$ см⁻³ дрейф напряжения за 100 с не должен превышать 0,0005%.

Паразитный ток второго рода генерируется изоляторами измерительного конденсатора и электрометра. Этот ток включает две составляющие - ток раздражения и электрохимический ток. Утечка под действием напряжения измерительного конденсатора в современных счетчиках всегда полностью исключена и здесь не рассматривается. Ток раздражения возникает после приложения к изолятору случайного импульса напряжения и после любого механического воздействия. Сила тока может достигать 10^{-12} А и больше. После восстановления покоя паразитный ток постепенно затухает, однако этот процесс длится часами и даже сутками. Причина электрохимического тока - загрязнение поверхностей изолятора и металлических держателей изоляторов адсорбированной влагой и примесями воздуха. Изолятор сравним с гальваническим элементом, обладающим случайной электродвижущей силой порядка 0,1 В. Внутреннее сопротивление равно сопротивлению поверхности изолятора. Сопротивление высококачественного и хорошо очищенного изолятора около 10^{15} Ом, что означает паразитный ток порядка 10^{-16} А. Если изолятор очищен спиртом невысокого класса чистоты, то электрохимический ток будет на порядок или два больше.

Паразитный ток третьего рода возникает внутри электрометрического усилителя и зависит от его качества. В электрометрических усилителях среднего качества паразитный ток порядка 10^{-15} А.

Паразитный ток второго и третьего рода ограничивает порог чувствительности счетчика легких аэроионов. В практике очень трудно обеспечить измерения с точностью 10% при концентрациях аэроионов ниже 100 см⁻³.

Действие паразитного тока частично подавляется систематической коррекцией нуля. Наивысшую чувствительность обеспечит частая автоматическая коррекция нуля, осуществляемая при модуляционном методе измерения.

В случае загрязнения измерительного конденсатора радиоактивным веществом возникает еще паразитный ток четвертого рода, обусловленный интенсивным ионообразованием между обкладками измерительного конденсатора. В незагрязненном измерительном конденсаторе такой паразитный ток не заметен на фоне паразитного тока, генерируемого изоляторами.

2.6. Пределы измерения

Диапазон измерения аспирационного счетчика ограничивается как по концентрации аэроионов, так и по предельной подвижности. При этом конкретный диапазон по концентрации существенно зависит от предельной подвижности.

Нижний предел по концентрации ограничивается порогом чувствительности. При понижении предельной подвижности нижний предел измерения по концентрации растёт, пока счетчик не потеряет эффективность по причине недостаточной чувствительности. Это определяет нижний предел измерения по предельной подвижности. В случае счетчиков тяжелых аэроионов и универсальных счетчиков нижний предел измерения по предельной подвижности обычно $0,0001... 0,001$ см²/(В·с).

Верхняя граница предельной подвижности определяется тем, что аэроионов с подвижностью выше $2,5$ см²/(В·с) нет и поэтому нет потребности в предельной подвижности свыше $2,5...3$ см²/(В·с).

Расширение диапазона измерения по концентрации аэроионов в сторону больших концентраций кажется очень простым - необходимо понизить чувствительность электрометра, что не встречается ника-

ких ограничений. Реальный верхний предел измерения концентрации аэроионов определяется другими факторами - нестабильностью концентрации аэроионов и возникновением искажающего электрического поля объемного заряда в измерительном конденсаторе.

Нестабильность концентрации легких аэроионов описывается формулами (4) и (5). Если воздух вводится в счетчик за 0,1 с, то для обеспечения сохранности концентрации с ошибкой до 10% нельзя допустить концентрацию выше $350000 \dots 650000 \text{ см}^{-3}$. Начиная с таких же концентраций аэроионы сами станут искажать электрическое поле внутри измерительного конденсатора, что также ведет к ошибкам измерения. По указанным причинам верхний предел измерения универсальных счетчиков аэроионов по концентрации легких аэроионов не превышает 10^6 см^{-3} .

Нестабильность концентрации аэроионов пропорциональна их подвижности. Таким образом относительное искажение электрического поля внутри измерительного конденсатора зависит от предельной подвижности. Поэтому в области тяжелых аэроионов измеримые концентрации аэроионов существенно выше и верхний предел измерения может достигать 10^9 см^{-3} .

2.7. Репрезентативность измерений

Аспирационный счетчик измеряет аэроионы в том воздухе, который поступает в промежуток между обкладками измерительного конденсатора. Концентрация аэроионов в этом воздухе не обязательно равна концентрации аэроионов в той зоне, аэроионное состояние которой необходимо изучить. Если концентрация аэроионов во втягиваемом в счетчик воздухе та же, что и в исследуемой зоне, то говорят, что проба воздуха взята правильно и измерение репрезентативно.

Для обеспечения репрезентативности необходимо иметь четкое представление о двух возможных причинах нерепрезентативности измерений:

- 1) неоднородность распределения аэроионов в пространстве,
- 2) искажение концентрации аэроионов электрическим полем вблизи счетчика (внешний краевой эффект).

Рассмотренный в п. 2.4. внутренний краевой эффект не зависит от условий вне счетчика. Предположим, что счетчик сконстру-

ирован правильно и внутренний краевой эффект в достаточной степени подавлен.

Однородность распределения аэроионов зависит от распределения источников аэроионов в пространстве. В случае естественного ионообразования необходимо учитывать, что ионообразование имеет повышенную интенсивность вблизи разных поверхностей, поскольку радиоактивность твердых материалов превышает радиоактивность воздуха. В случае искусственной аэроионизации аэроионы создаются, как правило, в весьма малых выделенных объемах. Закономерности распространения аэроионов описаны в п. 1.6. Электростатическое рассеивание или рекомбинация или захват легких аэроионов аэрозольными частицами уничтожают аэроионы на пути их распространения, что может привести к сильной пространственной неоднородности распределения аэроионов.

Степень неоднородности распределения аэроионов лучше всего определить путем измерения. Если неоднородность существенна, то счетчик надо расположить непосредственно в исследуемой зоне, например, в зоне вдыхания воздуха людьми. Распределение аэроионов и внутри исследуемой зоны может оказаться существенно неоднородным. Тогда необходимо провести измерения во многих точках и взамен одного результата представить план распределения концентрации аэроионов.

Внешний краевой эффект наблюдается тогда, когда корпус счетчика заряжен одноименно с измеряемыми аэроионами. Тогда счетчик отталкивает измеряемые аэроионы и его показание будет намного ниже концентрации аэроионов в удалении от счетчика. Разноименный заряд корпуса счетчика не меняет концентрации аэроионов при входе в счетчик, хотя и вызывает интенсивное осаждение аэроионов на корпус счетчика. Доказано, что при движении аэроионов в электрическом поле закономерности, рассмотренные в п. 1.5, сохраняют силу.

Заряд корпуса счетчика может быть вызван как наличием напряжения между корпусом и землей, так и внешним электрическим полем. Если корпус прибора не заземлен, то захват аэроионов в измерительном конденсаторе может вызывать накопление заряда на приборе. Такое явление наблюдается при измерении искусственной униполярной аэроионизации. Тогда заряд прибора будет одноимен-

ным с зарядом аэроионов, что вызывает внешний краевой эффект. По указанной причине заземление корпуса счетчика аэроионов обязательно независимо от аналогичного требования правил безопасности.

В случае наличия внешнего электрического поля и заземленный корпус прибора может нести существенный электрический заряд. В случае искусственной униполярной аэроионизации внешнее электрическое поле создается объемным зарядом воздуха. При этом заряд заземленного счетчика будет разноименным по отношению к заряду аэроионов, что не вызывает краевого эффекта при измерении преобладающих аэроионов. В то же время результат измерения аэроионов обратной полярности может оказаться сильно уменьшенным.

В атмосфере вблизи поверхности земли существует электрическое поле с напряженностью порядка 100-200 В/м. Это поле направлено так, что заземленный счетчик получает отрицательный заряд. Это может исказить результаты измерения легких отрицательных аэроионов на открытом воздухе.

2.8. Обработка наблюдений

Первичная обработка наблюдений при измерениях с помощью интегрального аспирационного счетчика сводится к трем задачам:

- 1) вычисление предельной подвижности,
- 2) вычисление условной концентрации аэроионов,
- 3) расчет других характеристик спектра аэроионов.

В случае использования счетчика аэроионов Тартуского госуниверситета две первые задачи решаются с помощью панельного калькулятора и не представляют проблемы. Если соответствующие вычисления не реализованы в самом приборе, то они могут быть выполнены по формулам (9) и (10).

Из других характеристик спектра аэроионов можно вычислить:

- 1) скорректированную концентрацию легких аэроионов,
- 2) скорректированную условную концентрацию заряда тяжелых аэроионов,
- 3) полярную электропроводность воздуха,
- 4) среднюю подвижность легких аэроионов,
- 5) частые концентрации заряда для разных интервалов подвижностей.

Для обеспечения вычисления скорректированной концентрации легких аэроионов необходимо выполнить два измерения P_1 и P_2 при предельных подвижностях $k_1 = 0,3 \dots 0,7 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и $k_2 = 0,01 \dots 0,1 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Численное значение концентрации заряда легких аэроионов оценивается по формуле

$$n_e = P_1 - \frac{k_2}{k_1} P_2. \quad (12)$$

Поправка к P_1 обычно не превышает нескольких процентов, что оправдывает привычную оценку $n_e \approx P_1$.

Для вычисления скорректированной условной концентрации заряда тяжелых аэроионов из прямого результата измерения, произведенного при минимальной предельной подвижности, вычитается концентрация заряда легких аэроионов. Полученный результат интерпретируется все же как условная концентрация заряда по причине размытости нижней границы подвижности. Говорить о концентрации заряда тяжелых аэроионов можно только при условии, что предельная подвижность не превышает $0,0002 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Для определения полярной электропроводности воздуха измеряется P при $k_0 = 2,5 \dots 3 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Расчетная формула следующая:

$$\lambda_{\pm} = 0,016(P : \text{см}^{-3})(k_0 : \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})) \text{ фСм/м}. \quad (13)$$

Для вычисления средней подвижности легких аэроионов необходимы значения P_1 и P_0 , измеренные при предельных подвижностях

$$k_1 = 0,3 \dots 0,7 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с}) \quad \text{и} \quad k_0 = 2,5 \dots 3 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с}),$$

Расчетная формула следующая:

$$\bar{k} = (P_0/P_1)k_0. \quad (14)$$

Для вычисления частной концентрации заряда в определенном интервале подвижностей необходимо иметь четыре прямых результата измерения P_1, P_2, P_3, P_4 , соответствующие предельным подвижностям $k_1 > k_2 > k_3 > k_4$. Тогда частная концентрация заряда в интервале $(k_a \cdot k_b)$ равна

$$P(k_a, k_b) = \frac{k_3 P_3 - k_2 P_2}{k_3 - k_4} - \frac{k_1 P_1 - k_2 P_2}{k_1 - k_2}, \quad (15)$$

где k_a расположена в интервале (k_4, k_3) и k_b в интервале (k_2, k_1) . Точные значения границ k_a и k_b не известны.

Если бы значения $P_1 \dots P_4$ были известны точно, то формула (15) открыла бы широкие возможности для изучения детального спектра

подвижностей аэроионов. В действительности возможности пользования формулой (15) весьма ограничены. Причина в том, что операция вычитания в формуле увеличивает относительную погрешность измерения. При этом в погрешность измерения $P_1 \dots P_4$ должна быть включена амплитуда колебаний концентрации аэроионов во времени, поскольку значения $P_1 \dots P_4$ не могут быть зарегистрированы одновременно. Анализ погрешностей измерения можно найти в книге [9]. В практике формула (15) может быть использована только для достаточно широких интервалов подвижностей, например, при структуре $k_1:k_2:k_3:k_4 = 20:10:2:1$.

3. СЧЕТЧИК АЭРОИОНОВ

3.1. Измерительный конденсатор

Измерительный конденсатор, используемый в конкретном счетчике, может в некоторых деталях отличаться от описываемого ниже. Все необходимые уточнения можно найти в техническом описании конкретного прибора.

Общее устройство измерительного конденсатора изображено на рис. 4. Основные детали конденсатора - внешняя собирающая обкладка 10 и внутренняя отталкивающая обкладка 11 - изготовлены из мягкого алюминия. Рабочие поверхности обкладок отполированы. Это повышает устойчивость измерительного конденсатора к засорению ворсинками. Появление царапин на обкладках понижает устойчивость к засорению, но других отрицательных последствий не вызывает.

Действующая емкость измерительного конденсатора около 51 пф.

Внешняя обкладка имеет небольшую конусность, что помогает подавить турбулентность в измерительном конденсаторе. Обкладка закреплена с помощью одного кольцевого изолятора 9. Качество этого изолятора определяет чувствительность счетчика. Материал изолятора - фторопласт-4 или полипропилен. Фторопласт-4 максимально устойчив к длительному воздействию влаги, однако он весьма чувствителен к всяким раздражениям. Малейшее загрязнение портит качество его поверхности. Полипропилен менее чувствителен к раздражениям, и легче чистится.

Лабиринт между входной трубой 2, верхней частью внешней обкладки и экраном 4 весьма эффективно охраняет изолятор от загрязнения в процессе измерения.

Внешняя обкладка присоединяется к электрометру через клемму 15.

На входное отверстие внешней обкладки натянута сетка 3 из тонкой проволоки шагом в 2 мм. Сетка предохраняет от попадания насекомых и ворсинок между обкладками измерительного конденсатора. С другой стороны сетка экранирует отталкивающую внутреннюю обкладку от входной трубы 2 и тем самым подавляет краевой эффект. Если отказаться от сетки, то пришлось бы существенно увеличить длину пустой входной части внешней обкладки.

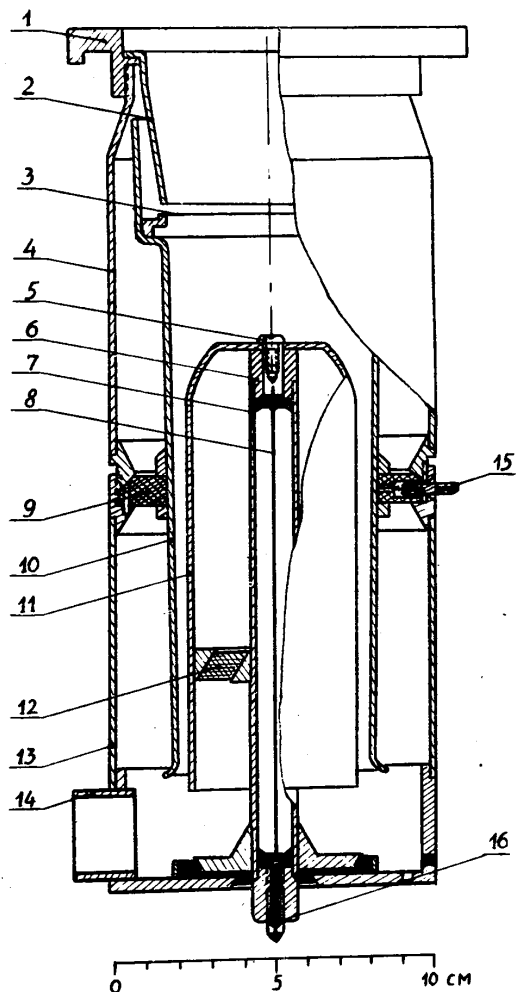


Рис. 4. Измерительный конденсатор

Заменить сетку на более плотную нельзя, это приведет к увеличению диффузионной адсорбции легких аэроионов на сетке. Оригинальная сетка адсорбирует 2...3% легких аэроионов.

Внутренняя обкладка присоединяется к источнику напряжения через клемму 16 и осевой провод 8. Она изолирована от заземленной опорной трубы 7 центральным изолятором 6 и кольцевым изолятором 12.

Для разборки измерительного конденсатора следует в первую очередь отвинтить кольцо 1 с входной трубой 2*. После этого с помощью специального приспособления можно вынуть сетку 3. Если необходимо вынуть из корпуса также внешнюю обкладку, то сетку предварительно вынимать не надо. Для дальнейшей разборки следует отключить провод 15, отвинтить и удалить верхнюю часть экранной трубы 4. После этого свободно вынимается внешняя обкладка вместе с изолятором 9. Изолятор от обкладки отделить нельзя. При необходимости можно снять также внутреннюю обкладку. Для этого достаточно отвинтить один винт 5, затем обкладка 11 и изолятор 12 свободно вынимаются. Измерительный конденсатор разобран полностью. Оставшиеся комплектные узлы смонтированы с использованием эпоксидного клея и не разбираются.

3.2. Воздушный тракт

Воздух втягивается в измерительный конденсатор сверху и вытягивается через штуцер 14. Вертикальное расположение измерительного конденсатора выгодно при изучении воздуха, который содержит частицы грубодисперсного аэрозоля, подверженные воздействию силы тяжести. Стандартные значения расхода воздуха следующие:

4500 см³/с
 1423 см³/с
 450 см³/с
 142 см³/с
 45 см³/с

* В измерительных конденсаторах старых моделей входная труба 2 прикреплена к экранной трубе 4 и не связана с кольцом 1. В этом случае сетка снимается только вместе с внешней обкладкой и не отделяется от последней.

Конкретное значение расхода выбирается путем переключения калиброванных диафрагм в воздухопроводе между измерительным конденсатором и отсасывающим вентилятором. В зависимости от конструкции счетчика используется от трех до пяти значений из вышеприведенного ряда стандартных расходов, причем значение $45 \text{ см}^3/\text{с}$ по мере возможности избегается. Воздух отсасывается с помощью центробежного вентилятора, который обеспечивает разрежение $35 \dots 40 \text{ мм}$ водяного столба. Обороты вентилятора хорошо стабилизированы. Развиваемое вентилятором разрежение может меняться при изменении температуры и давления воздуха. Однако при этом синхронно меняется также сопротивление диафрагмы и расход воздуха сохраняется.

Воздух, который прошел через измерительный конденсатор, диафрагму и вентилятор, выбрасывается через специальный штуцер и не попадает в корпус прибора.

В большинстве счетчиков используется еще дополнительный вентилятор, который не связан с воздушным трактом измерительного конденсатора. Этот вентилятор всасывает внешний воздух через специальный фильтр, наполненный влагопоглощающим веществом. Профильтрованный и осушенный воздух направляется в корпус прибора, где создается избыточное давление. Это исключает проникновение неосушенного внешнего воздуха в корпус прибора, где расположены электронные устройства, которые могут потерять работоспособность в условиях высокой относительной влажности. Утечка воздуха через щели в корпусе прибора весьма мала и такой счетчик может сохранить работоспособность при 100% относительной влажности вне прибора в течение 6 часов.

3.3. Электрическая схема

Подробная электрическая схема зависит от конкретного исполнения счетчика и приведена в его техническом описании. Однако, общие принципы электрической схемы счетчиков аэроионов Тартуского государственного университета одинаковы. Общая блок-схема изображена на рис. 5.

Источник высокостабильного напряжения выдает напряжение около 780 В , полярность напряжения выбирается переключателем. Кратковременная стабильность напряжения около $0,0001\%$. Это

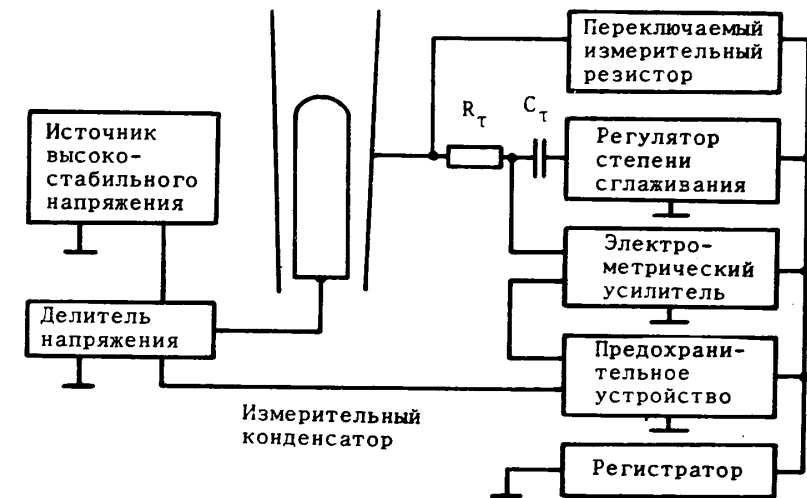


Рис. 5. Упрощенная блок-схема счетчика аэроионов

достигается применением двухступенчатого компенсированного параметрического стабилизатора. Выходные стабилитроны СГ301 работают в режиме максимальной стабильности (ток около 10 мкА) и защищены от быстрых колебаний температуры пенопластовой оболочкой. Источник напряжения сохраняет столь высокий класс стабильности только в условиях постоянной нагрузки.

Делитель напряжения снабжен переключателем и служит для подбора напряжения, которое требуется для обеспечения желаемой предельной подвижности. Делитель составлен из микропроволочных резисторов типа МРХ. Замена их на непроволочные резисторы недопустима, т.к. дрейф сопротивления обычных резисторов во времени приводит к снижению класса стабильности выходного напряжения и появлению заметного паразитного тока первого рода.

Входным элементом электрометрического усилителя является МОП-транзистор КП305. Транзистор специально подобранный, случайные экземпляры транзисторов того же типа непригодны. Электрометрический усилитель действует по принципу операционного усилителя и поддерживает напряжение на своем входе близким к

нулю. Ток аэроионов компенсируется током через переключаемый измерительный резистор, подключенный в цепь обратной связи и конструктивно встроенный в корпус электрометра. Максимальное используемое сопротивление измерительного резистора 1 Ом. Резисторы разных номиналов включаются с помощью миниатюрных электромагнитов. Переключение измерительных резисторов используется для грубого подбора диапазона измерения по концентрации. Диапазон уточняется с помощью делителя напряжения в цепи обратной связи.

Другая ветвь обратной связи проходит через регулятор степени сглаживания и конденсатор C_T . Если регулятор в нулевом положении, то C_T практически не влияет на процесс измерения. Если обратная связь через C_T отрегулирована на максимум, то постоянная времени сглаживания пульсаций концентрации аэроионов во времени определяется RC-цепью, состоящей из C_T , R_T и измерительного резистора. Постоянная времени может быть доведена до нескольких минут. Тогда прибор автоматически усредняет быстрые пульсации концентрации аэроионов, что выгодно в случае длительной регистрации результатов измерения на диаграмму самописца.

Предохранительное устройство предусмотрено для защиты электрометра и изоляторов от перегрузок. Входной МОП-транзистор электрометра выходит из строя при подаче на него напряжения порядка 10-20 вольт. В случае отсутствия предохранительного устройства включение неправильно выбранного диапазона измерения, а также переключение полярности или предельной подвижности без предварительного выключения режима измерения могут вывести электрометр из строя. Предохранительное устройство мгновенно переключает электрометр в нулевой режим в случае зашкаливания или любых ошибок оператора, которые могли бы повредить электрометр. Изолятор собирающей обкладки одновременно предохраняется от раздражения приложением напряжения.

3.4. Выбор режима измерения

Приступая к измерению с помощью счетчика аэроионов необходимо выбирать:

- 1) предельную подвижность,
- 2) постоянную времени сглаживания показания,
- 3) диапазон концентрации.

Предельная подвижность и диапазон концентрации взаимосвязаны через расход воздуха. Допустимый диапазон концентрации немного зависит от постоянной времени. Поэтому эти три величины должны быть установлены не в произвольной очереди, а именно так, как они перечислены выше.

Предельная подвижность зависит от цели и методики измерения. Если необходимо измерить концентрацию легких аэроионов без дополнительной уточняющей обработки данных, то выбирается предельная подвижность около $0,5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. В случае измерения проводимости воздуха выбирается предельная подвижность около $2,5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Концентрация тяжелых аэроионов измеряется в случае достаточно высокого значения на минимальной предельной подвижности, которую допускает прибор. В случае низкой концентрации это может оказаться невозможным по причине низкого уровня чувствительности. Тогда приходится увеличивать предельную подвижность до достижения минимально-необходимой чувствительности. Не следует выбирать предельную подвижность свыше $0,001 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, поскольку при этом ток тяжелых аэроионов является практически полностью омическим током и дальнейшее повышение предельной подвижности уже не облегчает измерение.

По причине недостаточной чувствительности большинства счетчиков предельная подвижность $0,001 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ стала своеобразным неофициальным стандартом при измерении тяжелых аэроионов.

В середине диапазона одна и та же предельная подвижность может быть реализована разными комбинациями расхода воздуха и напряжения измерительного конденсатора. В интересах точности измерения всегда следует использовать комбинацию с максимальным возможным расходом воздуха.

При выборе постоянной времени сглаживания показания следует исходить из того, представляет ли интерес определение размаха кратковременных колебаний концентрации аэроионов или необходимо измерить средний уровень концентрации. В первом случае необходимо выбирать минимальную постоянную времени, во втором случае - максимальную. Нередко оператор счетчика именно здесь поступает неправильно. Измеряя средний уровень, он старается побыстрее получить первоначальную оценку и включает

минимальное время сглаживания, а потом оставляет прибор в режим длительной регистрации на малом времени сглаживания. Результат - замазанная быстрыми колебаниями диаграмма. Временное включение минимального времени сглаживания при эмпирическом выборе диапазона концентрации вполне оправдано, однако при переходе к длительной регистрации обязательно надо включить большое время сглаживания.

Конкретный диапазон измерения по концентрации аэроионов должен быть максимально чувствительным, что еще не приводит к зашкаливанию. Если концентрация аэроионов заранее не известна, то эмпирический поиск диапазона начинают с самой грубой шкалы, постепенно переключаясь на более высокую чувствительность.

Степень страховки от зашкаливания зависит от того, снабжен ли конкретный счетчик дополнительным устройством автоматической деблокировки электрометра или нет. Большинство счетчиков не имеют такого устройства и любое случайное зашкаливание приводит к тому, что электрометр блокируется и запись с того же момента безвозвратно пропадает. Устройство автоматической деблокировки подключается к гнезду на передней панели счетчика. Это устройство делает с определенным периодом попытки вернуть счетчик в режим измерения и, если концентрация аэроионов вернулась в диапазон, то запись будет продолжаться.

Установка режима в счетчиках аэроионов Тартуского государственного университета выполняется с помощью панельного калькулятора и не требует никаких специальных вычислений.

Необходимо твердо запомнить, что переключение полярности и предельной подвижности допустимо только при заблокированном электрометре (нулевой режим). В противном случае может произойти раздражение изолятора и появиться паразитный ток, который понизит чувствительность. Режим электрометра переключается специальными кнопками и индицируется сигнальными лампами: нулевой режим - зеленый свет, режим измерения - красный свет.

3.5. Коррекция нуля

Аппаратная установка нуля выполняется не чаще, чем раз в сутки. Счетчик должен быть предварительно включен не менее 10 минут. Включается нулевой режим (зеленый свет) и наиболее

чувствительный диапазон по концентрации аэроионов. Предельная подвижность безразлична. Индикатор устанавливается на нулевое деление с помощью специальной ручки.

В случае точного измерения низких концентраций аэроионов, например, в случае атмосферно-электрических наблюдений, рекомендуется вычитать из результата измерения паразитный ток второго и третьего рода. Это называется коррекцией нуля в рабочем режиме. Ручка установки нуля при этом не используется. Нулевой отчет снимается периодически, обычно соблюдается одночасовой период. Процедура регистрации нуля рабочего режима следующая:

- 1) блокируется электрометр (зеленый свет),
- 2) напряжение измерительного конденсатора включается на нулевой уровень (предельная подвижность ∞),
- 3) деблокируется электрометр,
- 4) ожидается установление показания (не менее трехкратного времени сглаживания),
- 5) снимается нулевой отчет рабочего режима,
- 6) блокируется электрометр,
- 7) включается нормальная предельная подвижность,
- 8) деблокируется электрометр на продолжение измерения.

Упростить эту процедуру тем, что нуль напряжения меняется на нуль расхода, нельзя. В таком случае ошибка, обусловленная паразитным током четвертого рода, будет больше. Однако, дополнение описанной выше процедуры одновременным со снятием напряжения выключением расхода допустимо и даже полезно.

3.6. Диагностика и устранение отказов

Наблюдаются два вида отказов счетчика.

Отказы первого вида вызваны засорением измерительного конденсатора. Это естественное явление, которое не рассматривается как техническая неисправность счетчика и устраняется обычно без помощи инженера.

Отказы второго вида обусловлены техническими неисправностями и нередко означают потребность ремонта, который посилен только инженеру с высокой квалификацией или большим опытом.

В практике отказы первого вида составляют 80% от всех отказов. Пользователь счетчиком должен уметь определить, к ка-

кому виду относится любой конкретный отказ.

Существенны два признака засорения измерительного конденсатора:

- 1) прибор зашкаливает (блокируется), хотя концентрация аэроионов не может превышать предел измерения,
- 2) нуль рабочего режима (см. предыдущий пункт) сильно отличается от нуля заблокированного электрометра.

В случае первого признака необходимо проверить, сохраняется ли эффект зашкаливания в режиме нуля рабочего режима (см. предыдущий пункт). Если эффект сохраняется, то вероятна техническая неисправность и необходимо обратиться к инженеру. Если в режиме рабочего нуля прибор не зашкаливает, то вероятная причина отказа - длинная ворсинка, которая застряла в сетке или на обкладке измерительного конденсатора. Ворсинка, которая замыкает обкладки, дает эффект как при измерении легких, так и при измерении тяжелых аэроионов. В большом количестве случаев ворсинка не замыкает обкладки и дает эффект за счет появления коронного разряда только при измерении тяжелых аэроионов. Для устранения отказа в первую очередь надо снять и очистить сетку. Видимая ворсинка может быть удалена пинцетом. Полную очистку лучше всего провести струей воды, например, под водопроводным краном. Если чистка сетки не поможет, то следует чистить также обкладки. Сильно загрязненные обкладки надо промывать туалетным мылом и водой, что устраняет также осадок радиоактивных аэрозольных частиц. При повторных чистках достаточно пользоваться струей воды. Если все принятые меры не устраняют отказ, то вероятная причина зашкаливания - техническая неисправность.

Счетчик может остаться внешне работоспособным в условиях, когда сетка полностью покрыта короткими ворсинками. Это приводит к усиленной адсорбции легких аэроионов и может в определенной степени исказить результаты измерения. Поэтому сетку надо чистить в любом случае видимого загрязнения, не дожидаясь явного отказа.

Вероятная причина сильного сдвига нуля рабочего режима - засорение изолятора собирающей обкладки измерительного конденсатора. Такой отказ встречается редко. Обычно качество изолятора страдает не от засорения при эксплуатации, а от недоста-

точно тщательно проведенной чистки. Поэтому рекомендуется не прибегать к чистке изолятора, если его засоренность твердо не установлена. Профилактическую чистку изолятора вообще нельзя рекомендовать.

Если сдвиг нуля рабочего режима наблюдался в условиях длительной работы при высокой влажности, то следует счетчик примерно сутки выдержать в сухом помещении и затем снова проверить сдвиг рабочего нуля. Устойчивость нуля рабочего режима вне диапазона эксплуатационных климатических условий, указанных в формуляре прибора, не гарантируется.

Для чистки изолятора следует частично разобрать измерительный конденсатор, вынимая внешнюю обкладку вместе с изолятором. Изолятор надо чистить вначале с помощью спирта наивысшего класса чистоты и затем без промежуточной выдержки бидистиллированной водой. Особое внимание надо обратить на окрестность вывода электрометра. На изоляторе не должно остаться ни одной микроскопической ворсинки от материала, которая использовалась при чистке.

После чистки изолятора надо сушить изолятор выдерживанием в сухом незапыленном воздухе и затем собрать измерительный конденсатор. После чистки изолятор раздражен и в течение нескольких часов нуль рабочего режима может сильно отклоняться от нуля заблокированного электрометра. Результаты чистки изолятора могут быть проверены лишь после длительной выдержки.

В случае пользования фильтром влаги, который прикручивается к стенке, следует запомнить, что такой фильтр примерно через 6 часов работы теряет эффективность по причине насыщения силикагеля водой. Для восстановления адсорбционных свойств следует разобрать фильтр, высыпать силикагель и нагреть его до температуры 160...200°C. Использование более высокой температуры не разрешается, поскольку это привело бы к ухудшению адсорбционных свойств силикагеля как осушителя. Для полной сушки силикагеля при температуре 160...200°C требуется от одного до двух часов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чалмерс Дж.А. Атмосферное электричество. Л., 1974. 421 с.
2. Смирнов Б.М. Комплексные ионы. М., 1983. 150 с.
3. Лившиц М.Н., Моисеев В.М. Электрические явления в аэрозолях и их применение. М.-Л., 1965. 224 с.
4. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М., 1955. 351 с.
5. Таммет Х.Ф. К интерпретации электрической плотности аэрозоля. - Учен. зап. Тартуского гос. ун-та. Тарту, 1984, вып. 669, с. 31-38.
6. Минх А.А. Ионизация воздуха и ее гигиеническое значение. М., 1963. 352 с.
7. Шандала М.Г. Аэроионизация как неблагоприятный фактор внешней среды. Киев, 1974, 164 с.
8. Санитарно-гигиенические нормы допустимых уровней ионизации воздуха производственных и общественных помещений. М., 1980. 7 с.
9. Таммет Х.Ф. Аспирационный метод измерения спектра аэроионов. Учен. зап. Тартуского гос. ун-та. Тарту, 1967, вып. 195. 232 с.