

ТАРТУСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Х. Ф. ТАММЕТ

**АСПИРАЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗУЧЕНИЯ
ИОНИЗИРОВАННОГО ВОЗДУХА И АЭРОЗОЛЕЙ**

· АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

ТАРТУ 1964

Диссертация выполнена в Тартуском государственном университете.
Научный руководитель — кандидат физико-математических наук доцент
Я. Ю. РЕЙНЕТ (Тартуский государственный университет).

Защита назначена Советом физико-математического факультета Тартуского государственного университета на 1964 года.

Дата отправления автореферата 1964 года.

Ученый секретарь ТГУ:

Необходимость измерения характеристик ионизированного воздуха и аэрозолей возникает при исследованиях по различным отраслям науки. Результаты измерения концентрации и подвижностей атмосферных ионов представляют интерес как для геофизиков, так и для гигиенистов и медиков. Измерение электрических подвижностей взвешенных частиц позволяет определить спектр размеров частиц субмикроскопических аэрозолей. При решении некоторых технических проблем также встает задача изучения ионизации воздуха и электризации аэрозолей.

Аспирационный метод является наиболее универсальным и распространенным методом изучения аэроионов. Под термином «аэроионы» автор имеет в виду все взвешенные в воздухе частицы, средняя скорость движения которых описывается уравнением $v = u + kE$, где u — скорость течения воздуха, E — напряженность электрического поля и k — электрическая подвижность частицы.

Современные достижения в области быстро развивающейся техники измерения слабых токов открывают при разработке приборов для изучения аэроионов существенно новые возможности. Практическое применение искусственной ионизации вызывает интерес к особенностям методики измерений в условиях повышенной плотности объемного заряда и проводимости. Расширение диапазонов измерения неизбежно приводит к столкновению с ранее не учтенными побочными явлениями в измерительном конденсаторе, которые могут значительно исказить результаты измерений. Все это дает основание считать проблему усовершенствования теории методов изучения ионизированного воздуха и аэрозолей актуальной и заставляет обратить на нее должное внимание.

Диссертация посвящается уточнению теории аспирационного метода. Основное внимание обращается на оценку методических ошибок измерения и на изучение зависимости свойств аспирационного счетчика аэроионов от его конструктивных параметров.

Диссертация состоит из трех глав, разделенных на 34 параграфа.

В первой главе рассматривается общая теория аспирационных счетчиков в предположении стационарности поля течения и

спектра аэроионов. Доказано, что для любой области поверхности тока аэроионов с подвижностью k имеет место соотношение

$$\Phi + kN = 0, \quad (1)$$

где Φ — расход (объемная скорость) воздуха и N — поток электрического поля через рассматриваемую область поверхности тока. Этот результат позволяет построить теорию интегрального аспирационного счетчика в наиболее общем виде и устраняет основу споров [1, 2] об условиях, необходимых для оправданности теории аспирационного метода. Применяя соотношение (1) для крайней поверхности тока наименее подвижных аэроионов, еще полностью осаждающихся в осесимметричном измерительном конденсаторе, получим формулу предельной подвижности

$$k_0 = -\frac{\Phi}{N} = -\frac{\Phi}{4\pi CU}, \quad (2)$$

где C — действующая емкость измерительного конденсатора и U — напряжение между собирающей и отталкивающей обкладками. Формула предельной подвижности выведена без допущения дополнительных предположений о конфигурациях электрического поля и поля течения воздуха.

Выполненные расчеты подтверждают ранее известные результаты теории интегрального счетчика, а также обобщают их на случай измерительного конденсатора произвольной осесимметричной конфигурации.

Предлагаются графики для определения поправок к действующей емкости цилиндрического измерительного конденсатора соответственно конфигурациям концов внутренней обкладки. Графики составлены по результатам модельных измерений.

Для обработки наблюдений, выполненных интегральным счетчиком, разработан численный метод вместо обычно применяемого графического метода. Преимуществом численного метода является простота оценки экспериментальных ошибок. По опыту, проведенному в типичных условиях, затрата труда на обработку наблюдений численным методом составила 40% от затраты труда на обработку тех же наблюдений графическим методом.

Дифференциальные методы измерения описаны на основе результатов, полученных при рассмотрении интегрального метода. Приведены формулы для вычисления частных плотностей заряда, частных проводимостей и спектральной функции распределения плотности заряда по подвижностям, исходя из результатов наблюдений посредством дифференциальных счетчиков первого порядка с разделенным измерительным конденсатором или разделенным потоком воздуха.

Показано, что при измерении спектральной функции дифференциальным счетчиком второго порядка целесообразно соблюдать режим, при котором отношение расходов изучаемого и деионизированного воздуха равно отношению действующих емкостей обкладок. Рассмотрены методы измерения частных плотностей заряда и частных проводимостей дифференциальным счетчиком второго порядка при соблюдении соответствующих режимов.

Из сравнения метода промежуточного перемешивания воздуха [3] с обычными дифференциальными методами вытекает, что первый из них характеризуется малой чувствительностью и точностью, и не может иметь практической ценности. Метод измерения частных плотностей заряда малоподвижных аэроионов при помощи счетчика с промежуточным перемешиванием воздуха, предложенный в работе [4], оказывается необоснованным.

Во второй главе рассматривается влияние отклонений от идеализированных условий в аспирационном счетчике на результаты измерений. В предыдущей главе не представлялось необходимым учитывать конкретную геометрическую конфигурацию измерительного конденсатора, но при оценке искажений законченный расчет выполняется только для цилиндрического или плоского измерительного конденсатора.

Если внешняя обкладка измерительного конденсатора находится под напряжением относительно земли и отталкивает измеряемые аэроионы, то возникают искажения, известные под названием краевого эффекта. До сих пор считали, что ток краевого эффекта зависит от напряжения линейно [3, 5]. Представленные теоретические соображения показывают, что краевой эффект при описанных условиях имеет нелинейный характер. Были поставлены опыты, при которых измерялся непосредственно ток краевого эффекта, протекающий через входную трубу счетчика. На основе полученных результатов построены графики зависимости эффективной емкости кажущегося предварительного конденсатора от критериев подобия. Для большинства входных устройств в режиме 5%-ного насыщения тока краевого эффекта указанная емкость порядка $0,18 \div 0,50 r$, а при 95%-ном насыщении порядка $0,10 \div 0,18 r$, где r — радиус входной трубы.

Объемный заряд внутри измерительного конденсатора вызывает электростатическое рассеивание аэроионов и появление наведенного заряда на обкладках. Учет действия объемного заряда в аспирационном счетчике не вызывает серьезных математических затруднений лишь при предположении однородного распределения плотности заряда между обкладками измерительного конденсатора. При этом предельная подвижность счетчика с цилиндрическим измерительным конденсатором выражается формулой

$$k_0 = \frac{\Phi}{4\pi C U' (1+b)} \ln \frac{U-U'}{U+bU'}, \quad (3)$$

где U' — равновесное напряжение собирающей обкладки,

$$U' = a\rho. \quad (4)$$

При внутренней собирающей обкладке

$$a = \pi(r_2^2 - r_1^2 - 2r_1^2 \ln \frac{r_2}{r_1}), \quad (5)$$

$$b = \frac{\pi}{a} (2r_2^2 \ln \frac{r_2}{r_1} - r_2^2 + r_1^2), \quad (6)$$

где r_2 и r_1 — радиусы внешней и внутренней обкладок.

Приведена оценка ошибки, обуславливаемой электродным эффектом внутри измерительного конденсатора. Наибольшее значение электродный эффект имеет при измерении проводимости. Предположив, что распределение скоростей течения воздуха в измерительном конденсаторе однородно, можно найти следующее выражение максимальной относительной ошибки:

$$\delta = |2\pi t_0 k_{\pm} \rho_{\mp}|, \quad (7)$$

где t_0 — время заполнения конденсатора, k_{\pm} — подвижность и ρ_{\mp} — полярная плотность заряда аэроионов. Та же задача решена для течения с тонким пограничным слоем и для установившегося ламинарного течения. При этом ошибка в несколько раз превышает значение, вычисленное по формуле (7).

В результате тепловой диффузии происходит рассеивание траекторий аэроионов в измерительном конденсаторе. Относительное квадратическое среднее отклонение измеренной подвижности от среднего значения выражается следующим образом:

$$s_k = \sqrt{\frac{2KT}{qU}} \mu, \quad (8)$$

где K — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, q — заряд аэроиона, U — напряжение измерительного конденсатора. Для цилиндрического конденсатора имеем

$$\mu = \frac{r_2^2 - r_1^2}{2l^2} + \frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (9)$$

где l — длина конденсатора.

Действие турбулентного перемешивания воздуха аналогично действию тепловой диффузии на результаты измерения. Ввиду отсутствия достаточно подробных данных о турбулентном течении в трубе с кольцевым сечением нельзя провести закон-

ченного теоретического расчета турбулентного рассеивания подвижностей.

При упрощающих предположениях выводится формула

$$s_{kt} = \sqrt{\bar{R}} \bar{\epsilon} \mu_t, \quad (10)$$

где \bar{R} — отношение соответствующего эффективного масштаба турбулентности (одного и того же порядка с разностью $r_2 - r_1$) к длине траектории аэроиона, $\bar{\epsilon}$ — некоторое среднее значение интенсивности турбулентности и μ_t — параметр, близкий к отношению $l/(r_2 - r_1)$.

При турбулентном течении воздуха в интегральном счетчике с коротким и широким измерительным конденсатором максимальная относительная ошибка силы тока через собирающую обкладку оценивается в первом приближении по формуле

$$\delta_l \approx 0,4 s_{kt}. \quad (11)$$

Экспериментально изучалось действие турбулентного перемешивания на результаты измерения спектральной функции в дифференциальном счетчике первого порядка с разделенной внешней обкладкой. Воздух поступал в измерительный конденсатор из турбулентного потока, выходящего из ионизатора со скоростью 2,15 м/сек. Полное предотвращение турбулентности в измерительном конденсаторе достигалось только в случае применения ламинаризирующей насадки, состоящей из конфузора и трех сеток. В табл. 1 приведены некоторые опытные значения относительного среднего квадратического отклонения s_{kt} .

Таблица 1

Входная насадка	s_{kt} при указанном числе Рейнольдса ($Re = \Phi/\pi v r_2$)					
	570	1 400	1 950	3 000	5 000	15 000
Ламинаризирующая	0	0	5%	7%	8%	—
Насадка с сеткой	10%	10%	10%	11%	11%	12%
Конфузор	14%	12%	12%	12%	11%	11%
Без насадок	> 45%	42%	35%	29%	21%	21%

Представленные в табл. 1 данные получены для измерительного конденсатора с параметрами: $r_2/r_1 = 8,4$, $l/r_2 = 2,5$ и $l'/r_2 = 3,8$, где l' — длина предварительного участка внешней об-

кладки. С увеличением длины l' характер зависимости $s_{kt}(\text{Re})$ сохраняется, причем количественные значения для разных типов насадок выравниваются. При больших значениях l' экспериментальные результаты дают $\bar{\varepsilon} \sim 1/20$, что согласуется с известными данными о развитом турбулентном течении в длинных трубах.

Найденная «обратная» зависимость $s_{kt}(\text{Re})$ при отсутствии ламинаризирующих приспособлений заставляет критически относиться к традиционным взглядам на проблему предотвращения турбулентности в измерительном конденсаторе аспирационного счетчика.

К кажущемуся рассеиванию подвижностей ведет также децентрирование цилиндрического измерительного конденсатора. Асимметрия электрического поля обуславливает рассеивание подвижностей в пределах относительной ошибки

$$\delta_k = \frac{8\Delta r(r_2^3 - r_1^3)}{3(r_2^2 - r_1^2)^2}, \quad (12)$$

где Δr — смещение осей внешней и внутренней обкладок. Асимметрия поля течения воздуха сказывается слабее.

К аналогичному результату ведет действие силы тяжести аэроионов в горизонтально расположенном цилиндрическом конденсаторе. При этом

$$\delta_k = \frac{2mg(r_2^3 - r_1^3) \ln \frac{r_2}{r_1}}{3qU(r_2^2 - r_1^2)}, \quad (13)$$

где mg — вес частицы.

Адсорбция аэроионов во входных устройствах счетчика обусловлена, главным образом, диффузией аэроионов. Зеркальные силы становятся существенными только для частиц, несущих более десятка элементарных зарядов. Адсорбция аэроионов при протекании воздуха через проволочную сетку может быть оценена по эмпирическим формулам теплоотдачи. Приближенное выражение относительной адсорбции аэроионов следующее:

$$A = 15 \frac{r_0^{0,385} r^{1,23}}{\Phi^{0,615} h \nu^{0,075}} \left(\frac{KTk}{q} \right)^{0,69}, \quad (14)$$

где r_0 и h — радиус проволоки и шаг сетки, r — радиус трубы, сечение которой покрыто сеткой и ν — кинематическая вязкость воздуха.

Формула (14) проверялась экспериментально. Расхождение расчетных и опытных данных не превышало 35%.

В работе [6] представлена формула адсорбции аэроионов в цилиндрической трубе при однородном профиле скоростей течения воздуха. Учет неоднородности профиля скоростей течения с помощью методов теории пограничного слоя дает в первом

приближении

$$A = 2,3 \frac{l^{1/2}}{\Phi^{1/2} \nu^{1/6}} \left(\frac{KTk}{q} \right)^{2/6}, \quad (15)$$

где l — длина трубы. При $\text{Re} < 1000$ расхождения между результатами поставленных опытов и найденными по формуле (15) значениями не превышали 25%, в то время как расхождения между опытными данными и значениями, вычисленными согласно работе [6], оказались двух-трехкратными.

Третья глава посвящена изучению зависимости основных параметров счетчика от элементов конструкции.

Чувствительность счетчика зависит, в первую очередь, от минимальной абсолютной ошибки измерения силы тока, протекающего через собирающую обкладку. Наибольшая чувствительность и быстродействие обеспечиваются измерением тока на накоплению заряда на емкости, если нулевой отсчет берется после размыкания контакта, замыкающего электрометр.

Кроме того, чувствительность счетчика ограничивается нестабильностью источников напряжения. При малой предельной подвижности на результат измерения сказывается изменение напряжения даже на десятитысячные доли процента.

Изучение спектрального распределения аэроионов посредством интегрального счетчика или дифференциального счетчика первого порядка затрудняется флуктуациями спектра аэроионов во времени [7]. Флуктуации спектра аэроионов обуславливают ошибку измерения, зависящую от дисперсии отношения разности средних значений силы тока через собирающую обкладку интегрального счетчика в соседние промежутки времени $t_1 = t_2 = t$ к среднему значению силы тока $s_{\Delta}^2(t)$. С целью получения количественных данных о флуктуациях проводимости атмосферного воздуха вне города были проведены специальные наблюдения. Воздух забирался с высоты 5 м. Использовался счетчик, имеющий постоянную времени переходного процесса 0,4 сек. Основные параметры измерительного конденсатора следующие: $r_2 = 14$ см, $r_1 = 2,3$ см, $l = 45$ см, $\Phi = 1,5$ м³/сек, $U = 2$ кв, $k_0 = 5$ см²/в.сек. Некоторые из результатов опытов приведены в табл. 2.

Таблица 2.

t (сек)	1,5	3	6	15	30	60	120	240	480
$s_{\Delta}(t)$ (%) в условиях сильных флуктуаций	10,5	12,0	13,1	11,1	9,4	7,3	7,2	9,9	11,4
$s_{\Delta}(t)$ (%) в условиях слабых флуктуаций	1,6	1,7	2,0	2,6	3,2	4,2	4,9	7,1	8,7

Из данных табл. 2 видно, что при сильных флуктуациях целесообразно использовать время осреднения порядка 1—2 мин.

Как сокращение, так и увеличение этого времени могут оказаться невыгодными. При сильных флуктуациях ошибки измерения настолько большие, что вычисление спектральной функции по результатам последовательно проведенных наблюдений посредством интегрального счетчика может вообще потерять смысл.

Рассмотрена проблема компенсации нестабильности напряжения источника питания посредством специальных схем включения измерительного конденсатора. Предложена новая схема включения, в которой измерительный конденсатор соединяется с электрометром через разделительный конденсатор. Схема с разделительным конденсатором допускает одновременное заземление внешней обкладки измерительного конденсатора и нулевой клеммы электрометра.

Для определения необходимой длины входного участка заземленной внешней обкладки выполнены модельные измерения, результаты которых могут быть представлены эмпирической формулой

$$l' \approx r_2 [\log(0,4 r_2/C^*) - 0,7 \log(r_2/r_1)]. \quad (16)$$

Здесь емкость C^* должна быть выбрана меньше минимального ожидаемого значения отношения $I\delta/4\pi U\lambda_{\pm}$, где δ — наибольшая допустимая относительная ошибка, обусловленная краевым эффектом. Аналогичное соотношение получено и для счетчика с внешней собирающей обкладкой.

Разработка методов оптимального конструктивного расчета счетчиков затруднена ввиду отсутствия необходимых данных. Полностью отсутствуют данные о зависимости допустимой напряженности электрического поля между обкладками измерительного конденсатора от скорости потока воздуха. Недостаточны данные о зависимости разрешающей силы счетчика от расхода воздуха. В диссертации удалось частично разрешить лишь проблему расчета измерительного конденсатора на наилучшую чувствительность. Соответствующая оптимальная действующая емкость вычисляется из уравнения, коэффициенты которого зависят от параметров электрометра и изоляторов, максимального напряжения и расхода, паразитной емкости, минимальной предельной подвижности и отношения чувствительностей при минимальной и максимальной предельной подвижностях.

В конце диссертации приведен краткий обзор известных конструкций аспирационных счетчиков и описан переносный интегральный счетчик САИ-ТГУ-64, сконструированный под руководством автора. Счетчик снабжен коническим сужающимся измерительным конденсатором с сеткой во входном устройстве. Применен динамический электрометр, вход которого подключен к внешней обкладке измерительного конденсатора. Предусмот-

рена возможность подключения внешнего самописца с номинальным напряжением до 15 в и потреблением тока до 5 ма. Предельная подвижность регулируется в диапазоне 0,0004—3,2 см²/в.сек, расширенный диапазон начинается от 0,0001 см²/в.сек. Диапазоны концентраций аэроионов от 0—500 до 0—50 000000 эл.зар./см³. Отсчет берется непосредственно по соответствующей шкале. Габариты счетчика 25 × 34 × 43 см³, вес 13,4 кг. Питание от сети переменного тока, потребляемая мощность не более 35 вт.

Основные результаты диссертации сводятся к следующему:

1. Теория аспирационных счетчиков аэроионов обобщена на случай измерительного конденсатора с произвольной осесимметричной конфигурацией. Сформулированы и решены некоторые новые задачи общей теории аспирационного метода.

2. Уточнена теория краевого эффекта. Выведены формулы для оценки ошибок, обуславливаемых электрическим полем объемного заряда, силой тяжести, тепловой и турбулентной диффузией и адсорбцией аэроионов.

3. Выяснена зависимость случайных ошибок измерения от параметров счетчика и от флуктуаций спектра аэроионов. Разработаны некоторые элементы методики конструктивного расчета аспирационных счетчиков.

Полученные результаты внедрены в практику конструирования аспирационных счетчиков и обработки наблюдений за спектральным распределением аэроионов.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Таммет Х. Ф., Изв. АН СССР, сер. геофиз., 1263, 1960.
2. Таммет Х. Ф., Бюл. изобр., Авт. свид. № 151071, 1962.
3. Таммет Х. Ф., Изв. АН СССР, сер. геофиз., 845, 1962.
4. Таммет Х. Ф., Тр. Гл. геофиз. observ., 136, 103, 1962.
5. Таммет Х. Ф., Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 140, 46, 1963.
6. Таммет Х. Ф., Тр. Гл. геофиз. observ., 143, 71, 1963.
7. Таммет Х. Ф., Тр. всес. научн. метеорол. совещания, т. 9, 322, 1963.
8. Таммет Х. Ф., Изв. АН СССР, сер. геофиз., 436, 1964.

Цитированная литература:

1. Misaki M. A., Papers Meteorol. and Geophys. 11, 348, 1960.
2. Hoegl A., Z. angew. Phys. 16, 252, 1963.
3. Israel H., Atmosphärische Elektrizität, T. I, Geest & Portig K.-G., Leipzig, 1957.
4. Герасимова М. Н., Тр. НИУ ГМС СССР, сер. 1, 5, 24, 1941.
5. Siksnas R., Ark. geofys. 1, 483, 1950.
6. Siksnas R., Metnieks A., Z. angew. Phys. 5, 454, 1953.
7. Dessauer F., Graffunder W., Laub J., Ann. Meteorol., 7, 173, 1955—1956.

Х. Ф. Таммет
АСПИРАЦИОННЫЙ МЕТОД
ИЗУЧЕНИЯ ИОНИЗИРОВАННОГО
ВОЗДУХА И АЭРОЗОЛЕЙ

Сдано в набор 14/XI 1964. Подписано к
печати 19/XI 1964. 60 × 90, 1/16. Печ. л. 0,75
Тираж 200 экз. МВ-09279. Заказ № 8783.
Типография им. Х. Хейдеманна, ЭССР,
г. Тарту, ул. Юликооли, 17/19. II

Бесплатно